

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos

Juha-Matti Hirvonen

Skintillaatiohiukkasmittauksen kehittäminen digitaalisella signaalinkäsittelyllä

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten Espoossa 6.3.2009.

Kerava, 5.3.2009

Valvoja: Professori Matti Karjalainen

Ohjaaja: DI Riikka Väänänen

Tekijä:	Juha-Matti Hirvonen
Työn nimi:	Skintillaatiohiukkasmittauksen kehittäminen digitaalisella signaalinkäsittelyllä
Päivämäärä:	5.3.2009 Sivuja: 57 + 11
Tiedekunta:	Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta
Professuuri:	S-89 Akustiikka ja äänenkäsittelytekniikka
Työn valvoja:	Prof. Matti Karjalainen
Työn ohjaaja:	DI Riikka Väänänen
<p>Tässä diplomityössä on kehitetty optiseen hiukkaspäästömittaukseen skintillaatiomenetelmää. Työ on tehty hiukkaspäästömittareita valmistavalle MIP Electronics Oy:lle.</p> <p>Perinteinen optinen tapa mitata hiukkaspäästöjä on opasiteettimenetelmä, jossa savun kanavan läpäisevän valonsäteen intensiteetin alenemasta lasketaan hiukkaskonsentraatio. Tässä työssä tutkittiin opasiteettimenetelmään osin perustuvaa skintillaatiomenetelmää. Siinä läpäisevän valon intensiteetin kohinan varianssia verrataan intensiteetin keskiarvon neliöön. On teoreettisesti osoitettu, että tämä suhde on suoraan verrannollinen hiukkaspitoisuuteen, ja ettei siihen vaikuta optiikan likaantuminen.</p> <p>Työssä laadittiin malli intensiteettikohinan simuloimiseksi sekä estimaattori nopeuttamaan mittausten tulkintaa. Laboratoriomittauksia varten rakennettiin mittalaitteisto, jolla ilmiötä tutkittiin.</p> <p>Skintillaation soveltuvuutta hiukkasmittaukseen ei täysin tämän työn puitteissa pystytty selvittämään. Mittausjärjestelyissä ilmeni mm. mittauspölyn syötössä puutteita, joista johtuen mittattava ilmiö ei pysynyt vakaana. Lisäksi skintillaatio teoriasta poiketen vastasi hiukkaskonsentraatiota neliöllisesti. Kun tämä otettiin huomioon, voitiin kuitenkin todeta, että skintillaatiomenetelmällä saadut tulokset ovat oikean suuntaisia, ja että optiikan likaantuminen ei vaikuta tulokseen.</p> <p>Työn yhteydessä tehdyt selvitykset antavat hyvän pohjan menetelmän edelleen kehittämiseksi.</p>	
Avainsanat: skintillaatio, opasiteetti, hiukkasmonitorointi	

Author:	Juha-Matti Hirvonen	
Name of the Thesis:	Development of scintillation particle monitoring by using digital signal processing	
Date:	March 5, 2009	Number of pages: 57 + 11
Department:	Faculty of Electronics, Communications and Automation	
Professorship:	S-89 Acoustics and Audio Signal Processing	
Supervisor:	Prof. Matti Karjalainen	
Instructor:	Riikka Väänänen, M.Sc.	
<p>The aim of this thesis was to develop a scintillation method for the optical measurement of particle emissions. The work was done for MIP Electronics Oy that manufactures particle emission measurement instruments.</p> <p>The existing optical method to measure the particle emissions is the opacity method, which measures the attenuation of the light intensity caused by the smoke in the stack. The scintillation method is based on the opacity method. Its' idea is to compare the variance of the intensity of the light to the square of the mean of the intensity. According to the theory, this ratio is proportional to the particle concentration, and it is also not affected by the contamination of the optics.</p> <p>In this work a model was made to simulate the scintillation and a test chamber constructed for scintillation measurements. The work also includes an estimator to speed up the calculation.</p> <p>The suitability of the scintillation method for particle monitoring could not be completely solved in this work. Due to the problems with dust feed, the measured phenomenon was not stable. According to the measurements, the scintillation turned out to be proportional to the square of the particle concentration, unlike the theory. When taking this into account the results showed that the scintillation followed the particle density, and also that the contamination of the optics had no effect on the measurement results.</p> <p>The studies give a good basis to continue developing the method.</p>		
Keywords: scintillation, opacity, particle monitoring		

Alkusanat

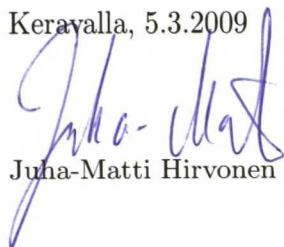
Keväällä 2008 minulle tarjoutui tilaisuus tehdä diplomityö hiukkaspäästömittauksen kehittämisestä MIP Electronics Oy:lle. Tämän työn tekeminen on ollut mielenkiintoinen kurkistus hiukkasmittaukseen. Iso kiitos koko MIPin henkilökunnalle – etenkin Arskalle ja Pekalle, jotka tietävät elektroniikasta ja mittaamisesta suunnilleen kaiken tietämisen arvoisen.

Lämpimät kiitokset esitän työn ohjaajana toimineelle Riikka Väänäselle, jonka puoleen oli helppo kääntyä aina, kun työ takkusi. Riikka auttoi myös paljon lähdeaineiston haussa ja työn jäsentelyssä. Matti Karjalaista haluan kiittää työn tarkastamisesta ja monista parannusehdotuksista.

Ison kiitoksen olen velkaa vaimolleni, joka ehkä parhaiten ymmärtää minua.

Kiitos Kaikkivaltiaalle kaikesta mahdollisesta.

Keravalla, 5.3.2009


Juha-Matti Hirvonen



Sisältö

Sisältö	v
Lyhenteet ja termit	vii
Kuvat	x
1 Johdanto	1
2 Hiukkasmittauksen taustaa	4
2.1 Savunäytteen massan tutkiminen	5
2.2 Paine-eromenetelmä	6
2.3 β -säteilyn absorptio -menetelmä	7
2.4 Tribosähköinen mittaussmenetelmä	7
2.5 Absorptio ja sironta	7
3 Optinen hiukkasmonitorointi	10
3.1 Opasiteettihiukkasmittaus	10
3.1.1 Edut ja heikkoudet	12
3.1.2 Opasiteettihiukkasmittauksen teoriaa	12
3.1.3 Teknisiä ratkaisuja ja ongelmia	14
3.1.4 Kalibrointi	15
3.2 Skintillaatio	15
3.2.1 Instrumenttikohinan vaikutus skintillaatioon	19
3.2.2 Skintillaation numeerinen laskenta	21
3.2.3 Virhelähteitä	24
3.2.4 Huomioita menetelmästä	25

4	Opasiteettikohinan mallintaminen	26
4.1	Hiukkasmalli	26
4.2	Mallin toimivuus	28
4.3	Muuta tarkastelua	29
5	Laboratoriomittauksen laitteisto	33
5.1	Mittausjärjestelyt ja -kytkennät	33
5.2	Ongelmia	39
6	Laboratoriomittauksen tulokset	40
6.1	Tulokset	41
6.2	Skintillaatio	42
6.3	Vaimennus	45
6.4	Estimaattorin toiminta	47
7	Johtopäätökset	50
7.1	Yhteenveto työstä ja tuloksista	50
7.2	Tavoitteet	50
7.3	Mittaukset	51
7.4	Suosituksia	52
	Kirjallisuutta	54
A	Simuloinnin lähdekoodi	56

Lyhenteet ja termit

Karkeat hiukkaset, PM ₁₀	Hiukkaset, joiden halkaisija on 2,5 – 10 μm
Pienhiukkaset, PM _{2,5}	Hiukkaset, joiden halkaisija on alle 2,5 μm
Ultrapienet hiukkaset	Hiukkaset, joiden halkaisija on alle 0,1 μm
Läpäisevyys, T	Läpäisevän ja lähtevän valon intensiteettien suhde $T = \frac{I_x}{I_0}$
Opasiteetti	Säteen intensiteetin vaimeneminen savussa
Opasiteettimenetelmä	Hiukkaskonsentraation laskeminen mitatusta läpäisevyydestä
Skintillaatiomenetelmä	Hiukkaskonsentraation laskeminen mitatun läpäisevyyden kohinasta
Opasiteettiprosentti, O	Intensiteetin vaimeneminen prosenteissa $O = (1 - T) \cdot 100 \%$
Optinen tiheys, D	Hiukkaskonsentraatiolle suoraan verrannollinen tunnusluku, $D = -\log_{10}(1 - O) = -\log_{10} T$
Skintillaatio	Skintillaatiomenetelmällä saatu hiukkaskonsentraatioon verrannollinen tunnusluku. (Kirjallisuudessa nimitystä käytetään myös opasiteettikohinasta)
Nollataso, zero	Taso, johon mittarin nollakohta kiinnitetään
Kalibrointitaso, span	Vakiotaso, jolla mittarin asteikko kalibroidaan
Single Pass, SP	Menetelmä, jossa lähetin ja vastaanotin ovat eri puolilla piippua ja säde läpäisee piipun vain kerran

I_0	Lähtevän valon intensiteetti
I_x	Vastaanotetun valon intensiteetti
$I_{x,i}$	Vastaanotetun valon intensiteetti, kun säteen edessä on yksi hiukkanen
I_t	Läpäisyintensiteetti, kun kanavassa ei ole pölyä
N_0	Ilmaisimen kohina, kun laser on sammutettu tai ilmaisim peitetty
d_h	Hiukkasen halkaisija
A_h	Hiukkasen poikkipinta-ala
$\overline{m_h}$	Hiukkasen keskimääräinen massa
d_s	Säteen halkaisija
A_s	Säteen poikkipinta-ala
l	Piipun halkaisija
c	Hiukkaskonsentraatio [mg/m ³]
c_N	Hiukkaskonsentraationa näkyvä instrumenttikohina
\hat{c}	Skintillaatiolla mitattu hiukkaskonsentraatio, joka sisältää instrumenttikohinan aiheuttaman virheen
N	Hiukkastiheys [1/m ³]
k	Opasiteettimenetelmän vakiokerroin
K	Skintillaatiomenetelmän vakiokerroin
UV	Ultravioletti
IR	Infrapuna
$\overline{x_{(i)}}$	$x_{(i)}$:n ja sitä edeltävien alkioden keskiarvo
$\widehat{x_{(i)}}$	edellisen estimaatti
$E[x]$	x :n odotusarvo

$\text{Var } x_{(i)}$	$x_{(i)}$:n ja sitä edeltävien alkioden otosvarianssi
$\widehat{\text{Var } x_{(i)}}$	edellisen estimaatti
$D[x]$	x :n varianssi
v_i	Virtausnopeus piipussa

Kuvat

1.1	Pienhiukkaskonsentraatio Helsingissä	2
2.1	Paine-eromittarin toimintamalli	6
2.2	Valon sironta hiukkasesta	8
2.3	Sirontamittaussauva savukanavassa	8
3.1	Ringelmannin asteikko ja opasiteettiprosentti	11
3.2	Hiukkaskonsentraation optinen mittaaminen savupiipussa	11
3.3	Mittausyhteeseen puhallettava puhdistusilma	14
3.4	Skintillaation ja hiukkaskonsentraation yhteys	16
3.5	Kohinan kertyminen	19
3.6	Keskiarvoistava IIR-suodatin	22
3.7	Keskiarvosuodattimen askelvaste	22
3.8	Varianssiestimaattorin vaste	24
3.9	Numeerisen laskennan toteutus lohkoaviona	24
4.1	Yhden hiukkasen aiheuttama negatiivinen pulssi	27
4.2	Simuloitu skintillaatio	29
4.3	Virtausnopeuden vaikutus läpäisyintensiteettiin ja skintillaatioon	31
4.4	Simuloidun kohinan taajuusanalyysi	32
5.1	Mittauslaitteisto	34
5.2	Testipölyn kokojakauma	34

5.3	Mittauskammio ja -yhteet	35
5.4	Opasiteettimonitori LM3188	35
5.5	Opasiteettimittarien vertailu	36
5.6	Mittauskytkennän periaate	37
5.7	Pölynsyöttölaite	37
5.8	Mittauskammio päältä	38
5.9	Kokonaiskuva mittausjärjestelyistä	38
6.1	Mitattua skintillaatiokohinaa	41
6.2	Mittarin D-arvon ja signaalin $I_{x,2}$ logaritmin vertailua	43
6.3	Skintillaatiomittaukset pölyllä ja tuhkalla	44
6.4	Läpäisyintensiteetti vaimennetulla ja vaimentamattomalla säteellä . . .	46
6.5	Vaimennuksen vaikutus skintillaatioon	47
6.6	Estimaattorilla tulkittua mittausdataa	48
6.7	Estimaattorin ja numeerisen laskennan vertailua	49

Luku 1

Johdanto

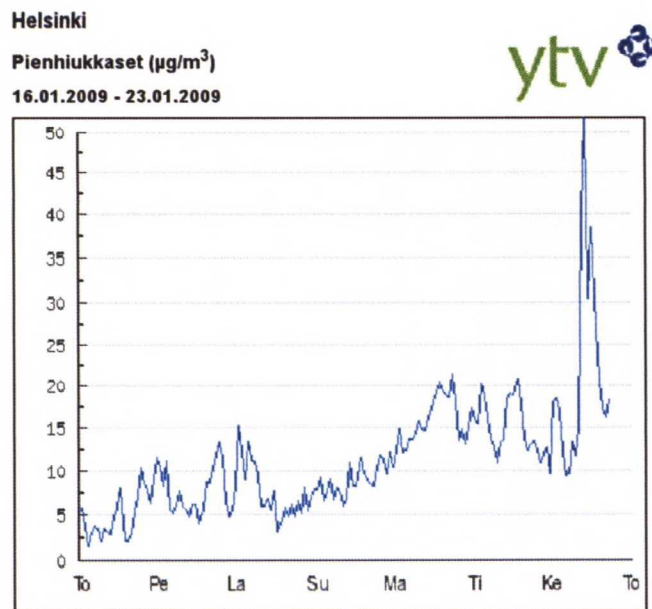
Tämä diplomityö on tehty MIP Electronics Oy:lle, joka valmistaa hiukaspäästömittareita teollisuuden ja lämpölaitosten käyttöön.

Ilman epäpuhtauksista hiukkaset jaetaan koon mukaan karkeisiin hiukkasiin (halkaisija alle $10\text{ }\mu\text{m}$), pienhiukkasiin (halkaisija alle $2,5\text{ }\mu\text{m}$) ja ultrapieniin hiukkasiin (halkaisija alle $0,1\text{ }\mu\text{m}$). Ihmisen hengityselimistö on vastustuskykyinen kohtuulliselle määrälle karkeita hiukkasia, ja ne yleensä jäävätkin keuhkojen yläilmateihin. Sen sijaan pienhiukkaset kulkeutuvat keuhkojen alailmateihin asti ja etenkin ultrapienet hiukkaset saattavat päästä keuhkorakkuloiden sisään. Normaalisti elimistön vastareaktiot poistavat nämä hiukkaset, mutta jos hiukkasia on riittävän paljon, puolustusmekanismit lakkaavat toimimasta (Oksa, 2008).

Hiukkasten kulkeutuminen ilmakehässä voi olla tuhansia kilometrejä. Hiukkaset voivat reagoida ilmakehän yhdisteiden kanssa siten, että niiden terveysvaikutukset muuttuvat. Yleensä reaktiossa pienhiukkasten osuus vähenee ja siksi lähialueen hiukaspäästöt ovat pääsääntöisesti haitallisempia kuin kaukokulkeuman mukana tulevat hiukkaset (Pakkanen, 1997). Reaktiosta mainittakoon esimerkkeinä koagulaatio ja märkädepositio. Koagulaatiossa hiukkaset törmäävät toisiinsa tarttuen kiinni isommiksi hiukkasiksi. Märkädepositiossa ilmakehän kosteus tiivistyy hiukkasiin muodostaen pilviä ja hiukkaset tulevat sateen mukana maahan (Ilmatieteen laitos, 2008).

Ilman pienhiukkasten aiheuttamien terveysvaikutusten vuosikustannukseksi Euroopan unionissa on arvioitu 270–780 miljardia euroa. EU:n *Clean Air For Europe (CAFE)* -ohjelmassa saatujen tulosten mukaan pienhiukkaset aiheuttivat vuonna 2000 Suomessa 1300 ennen aikaista sydän- ja verisuonisairaiden kuolemantapausta ja EU:n laajuisesti

350 000 (Huttunen, 2006). WHO:n arvion mukaan ilmansaasteet ja etenkin pienhiukkaset aiheuttavat Euroopassa 100 000–400 000 ennen aikaista kuolemaa ja lyhentävät elinikää keskimäärin vuodella (Tuomisto, 2001). Ilmansaasteiden suoraa vaikutusta sairastumisiin ja ennen aikaisiin kuolemantapauksiin on vaikeaa arvioida, siksi arviot eroavat toisistaan jonkin verran. Kuitenkin tutkimustiedon lisääntyessä arviot ovat kohonneet. Pienhiukkasten aiheuttamaa ongelmaa on EU:ssa lähdetty ratkaisemaan mm. ilmanlaatudirektiivillä (2008/50/EY), jonka mukaan ilman pienhiukkaspitoisuus tulisi saada vähennettyä keskimääräiseen $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vuoteen 2020 mennessä. Nykyisellään Suomessa raja-arvo on $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, vuodessa tämä saa ylittyä enintään 35 päivänä. Vuosikeskiarvon pitää olla alle $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Kuvassa 1.1 on pienhiukkaskonsentraatio Helsingissä Kallion mittausasemalla tammikuussa 2009, ja siinä näkyy yksi raja-arvon ylitys.



Kuva 1.1: Pienhiukkaskonsentraatio Helsingissä Kallion mittausasemalla (YTV, 2009)

Suomen ympäristökeskuksen mukaan alailmakehän pienhiukkasista yli puolet on peräisin energiantuotannosta, liikenteen päästöjä on noin kolmannes (Ympäristökeskus, 2006). Helsingin ilman pienhiukkasista valtaosa on peräisin puun pienpoltosta tai ilmakehään vapautuneista hiilivedyistä (Saarikoski, 2008). On luontevaa kohdistaa toimenpiteitä alueille, joilla vähennyksillä on eniten vaikutusta. Euroopan unionin direktiivillä suurista polttolaitoksista (2001/80/EY) ja jätteen poltosta annetulla direktiivillä (2000/76/EY) määritetään hiukkaspäästörajat polttolaitoksille. Niiden mukaan jätteenpolttouunien päästörajat ovat $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ ja voimalaitosten $30 \text{ mg}/\text{m}^3$ (alle 100 MW voimalaitoksilla $50 \text{ mg}/\text{m}^3$). Polttolaitosdirektiivin Suomessa täyttävä ase-

tus astui voimaan uusien laitosten osalta 9.12.2002 ja olemassa olevien laitosten osalta 1.1.2008. Jätteenpolttodirektiivin täyttämä asetus tuli voimaan uusien laitosten osalta 1.6.2003 ja vanhojen laitosten osalta 29.12.2005. EU:n ulkopuolella rajoitukset eivät ole yhtä tiukkoja.

Direktiivien voimaantulon myötä tiukentuneet päästörajat asettavat haasteen myös hiukkaspäästöjen mittaamiseen. Alhaisten pitoisuuksien mittaaminen edellyttää tarkempia mittareita ja pienempiä toleransseja. Myös mittauksen toteuttamista säädellään tarkasti ja tästä on tarkat standardit.

Opasiteettimittauksessa mitataan valon vaimenemista savukaasun läpi. Tässä työssä on haluttu kehittää optista mittausta siten, että hiukkaskonsentraation laskentaan käytetään keskiarvoluontoisen opasiteetin ohella tilastollisiin tunnuslukuihin perustuvaa skintillaatiota. Skintillaatiomittauksella haetaan mittaukseen tarkkuuden ja herkkyyden lisäksi parempaa kestävyyttä linssien likaantumiselle.

Työssä käsittelen luvussa 2 eri mittausmenetelmiä ja niiden ominaisuuksia. Luvussa 3 käyn läpi teoriaa, joka liittyy skintillaatiomittaukseen sekä opasiteettimittaukseen, johon skintillaatio osittain pohjautuu. Ilmiön tarkastelua varten tehty malli käydään läpi luvussa 4. Ilmiötä tutkittiin laboratoriomittauksin. Mittausjärjestelyt esittelen luvussa 5 ja -tulokset luvussa 6. Johtopäätökset ja suositukset ovat luvussa 7.

Luku 2

Hiukkasmittauksen taustaa

Teollistumisen alkuaikoina kohonneisiin hiukkaspäästöihin ei kiinnitetty huomiota. Asia nousi varsinaisesti esiin vasta 1900-luvun alkupuolella – ja vielä silloin päämotiivina päästöjen vähentämisessä oli materiaalin säästäminen. Tämän luvun lähteenä on käytetty (Födisch, 2004), (Electrowatt-Ekono, 2003) ja (Bivinis, 2000).

Savun hiukkaspitoisuuden mittaamiseen on kehitetty useita eri tekniikoihin perustuvia menetelmiä. Esittelen niistä muutamia myöhemmin tässä luvussa sekä seuraavassa luvussa opasiteettimenetelmän. Menetelmistä vain pölyn punnitsemisella saadaan selvitettyä hiukkaskonsentraatio suoraan, muut menetelmät antavat tulokseksi jonkin hiukkaskonsentraatioon verrannollisen arvon, esimerkiksi paine-eron, jännitteen tai intensiteettialeneman. Tällöin mittari pitää erikseen kalibroida ja tulos kiinnittää asteikkoon. Kalibrointiin voidaan käyttää esim. em. pölynäytteen punnitsemista. Mitta-asteikko voidaan selvittää myös laskennallisesti, kun tiedetään lähtötilanne ja prosessi, mutta tämä tapa ei yleensä täytä määräysten vaatimuksia. Myös kalibroinnista on annettu omat tarkat ohjeensa.

EU:ssa polttolaitosten toiminnalle vaaditaan ympäristölupa, joka edellyttää päästötarkkailua. Pääosin tämä on itsetarkkailua (self monitoring) eli toiminnanharjoittaja mittaa päästöjä itse viranomaisten hyväksymän ohjelman mukaisesti (VTT, 2004). Lupa voidaan sisällyttää myös määräyksiä esimerkiksi mittauksen toteuttamisesta ja mittarin kalibroinnista.

Suurissa polttoprosesseissa EU:n alueella päästöjä mitataan jatkuvatoimisesti, eli mitausprosessi on käynnissä koko ajan. Toisinaan savusta halutaan lisäksi selvittää esim. raskasmetallipäästöt, silloin savusta otetaan näyte, joka tutkitaan tarkemmin.

Jatkuvatoimiset mittaustavat jaetaan kahteen pääluokkaan: in-situ -menetelmiin, joissa savun ominaisuuksia mitataan suoraan savukaasusta kanavassa, ja ekstraktiivisiin menetelmiin, joissa savua johdetaan kanavan ulkopuolella olevaan mittalaitteistoon. In-situ -menetelmissä näytteenottosondit joutuvat alttiiksi savukaasun kuumuudelle, hapoille ja hiukkaskontaminaatiolle.

Savun mukana kulkeva kosteus aiheuttaa ongelmia kaikilla mittausten menetelmillä. Vesipisarot absorboivat ja sirottavat valoa ja β -säteilyä, pisaroilla on massa, ne kuljettavat sähkövarausta ja tukkivat näytteenottosondit ja -anturit sekä peilit ja linssit. Siksi in-situ -menetelmissä mittaus ja näytteenotto pitää tehdä, ennen kuin savu jäähtyy kastepisteen alle. Mikäli savun lämpötila jää tämän alle, pitää käyttää ekstraktiivista menetelmää, jossa savu jäähdytetään, kuivataan tai käsitellään muulla tavoin ennen mittaamista.

2.1 Savunäytteen massan tutkiminen

Savun hiukkaskonsentraation mittaaminen pölyä punnitsemalla juontaa juurensa 1800-luvun lopulle. Savukaasusta otetaan näyte, jonka tilavuus mitataan. Ilmasta erotetaan pöly esim. suodattimella, tämän jälkeen pöly punnitaan ja verrataan massaa näytteen kokoon ja savukaasun virtausnopeuteen piipussa. Menetelmä on hyvin tarkka mutta valitettavan hidas ja työläs. Siksi se ei sovellu jatkuvatoimiseen mittaamiseen. Sen sijaan menetelmää voidaan käyttää muiden menetelmien kalibroimiseen.

Keskeisiä asioita näytteenotossa ovat VTT:n mittaushjeen mukaan (VTT, 2007):

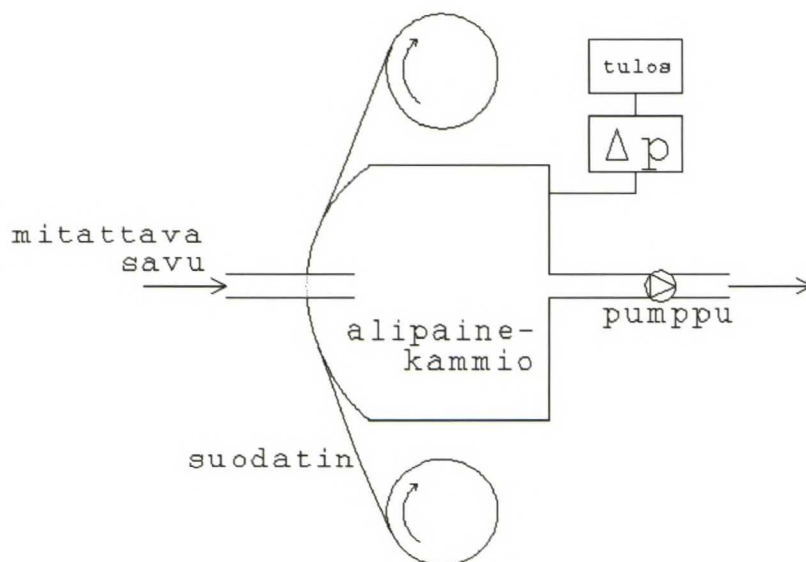
- näytteenoton edustavuuden varmistaminen
- näytteenottolinjan tiiveyden varmistaminen
- näytteenottosuuttimen seinäkosketuksen välttäminen
- isokineettinen näytteenoton hallinta niin, että näytteen virtausnopeus suuttimeen on sama kuin virtausnopeus kanavassa
- näytekaasun kuivumisen varmistaminen ennen kaasumäärän mittausta
- kanavan alipaineesta aiheutuvan sondin suuttimen imuvaikutuksen eliminoiminen, ettei osaa näytteestä menetettäisi

- sellaisen mittausyhteen vuodon estäminen, joka johtaisi näytteen laimentumiseen alipaineisessa kanavassa

Samat ohjeet pätevät kaikkiin näytteenottomenetelmiin, kuten β -säteilyn absorptioon ja paine-eromenetelmään.

2.2 Paine-eromenetelmä

Paine-eromittauksessa savupiipusta johdetaan savua alipainekammioon siten, että savu kulkee liikkuvan suodattimen läpi. Savun hiukkaset tarttuvat suodattimeen, jolloin suodattimen virtausvastus lisääntyy. Muuttunutta virtausvastusta verrataan referenssitasoon ja lasketaan tästä hiukkaskonsentraatio. Menetelmä on esitetty kuvassa 2.1.



Kuva 2.1: Paine-eromittarin toimintamalli (piirretty (Födisch, 2004, s. 6) mukaan). Savun hiukkasten tarttuminen kiertävään suodatinnauhaan lisää ilman virtausvastusta suodattimen läpi.

2.3 β -säteilyn absorptio -menetelmä

β -säteilyn absorptio -menetelmässä savunäyte johdetaan liikkuvan suodattimen läpi samalla tavalla kuin paine-eromenetelmässä. Menetelmässä mitataan β -säteilyn vaimenema pölyisen suodattimen läpi, verrataan sitä vaimenemaan puhtaan suodattimen läpi ja lasketaan tästä pölyn massa. Koska hiukkasnäyte jää suodattimelle, savun koostumusta voidaan myöhemmin tutkia tarkemmin.

2.4 Tribosähköinen mittausmenetelmä

Tribosähköisessä menetelmässä savukanavaan asennetaan metallisondi, johon savun hiukkaset törmäävät aiheuttaen hankaussähkövarauksen. Varaus mitataan ja siitä lasketaan hiukkaskonsentraatio.

Menetelmän antama tulos riippuu savun hiukkaskonsentraation lisäksi voimakkaasti hiukkasten kokojakaumasta, materiaalista, savun kosteudesta, lämpötilasta sekä virtauksen nopeudesta ja turbulenttisuudesta. Tavallisesti polttoprosessi on tasainen ja menetelmä mittaa luotettavasti hiukkaskonsentraatiota.

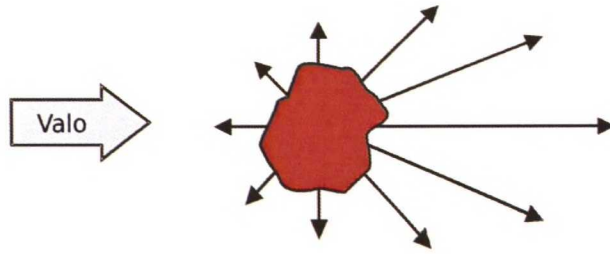
Vaikka sondi onkin piipussa välittömässä kosketuksessa savuun, sen nokeentuminen ei vaikuta mittaukseen. Tämä vähentää menetelmän huoltotarvetta.

Menetelmän käyttökelpoisuutta puolestaan vähentää huomattavasti sen soveltumattomuus piippuihin, joissa on sähköiset suodattimet. Sähkösuodattimen läpäisseillä hiukkasilla on suodattimesta johtuva sähköinen varaus, joka häiritsee mittauksia. Sähkösuodattimet ovat hyvin yleisiä.

Hieman vastaava menetelmä on asentaa piippuun kaksi sondia, joiden välillä on jännite. Savuhiukkaset kuljettavat varausta sondien välillä, mitatusta sähkövirrasta voidaan laskea hiukkaskonsentraatio.

2.5 Absorptio ja sironta

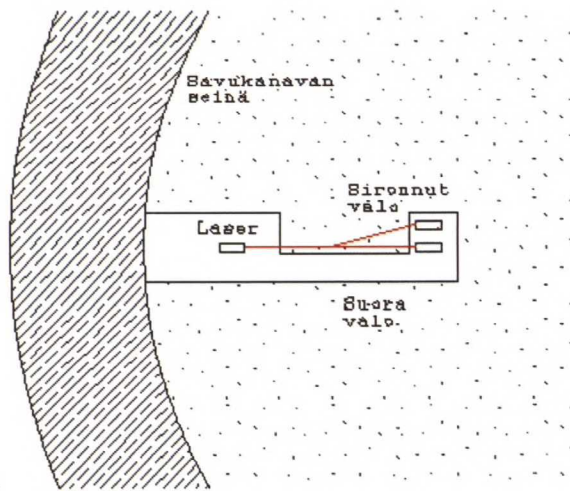
Kuvan 2.2 mukaisesti hiukkanen sekä absorboi että sirotttaa siihen osuvaa valoa. Opasiteettimenetelmällä mitataan valon intensiteetin alenemaa sen kulkiessa savun läpi, sirontamenetelmässä puolestaan hiukkasten sirottamaa valoa.



Kuva 2.2: Valon sironta hiukkasesta (Födisch, 2004, s 58)

Varhaisimmat sirontaan perustuvat mittarit mittasivat takasuunnasta eli heijastunutta valoa. Myöhemmin on kehitetty pienestä etusuunnan sirontakulmasta mittaavia laitteita. Sirontamenetelmä on hyvin herkkä pienillä pitoisuuksilla, mutta soveltuu huonosti suurille pitoisuuksille tai isoihin piippuihin.

Tyypillinen sirontamittari voi olla esimerkiksi kuvan 2.3 kaltainen piippuun asennettava mittaussondi. Sondissa on valolähde sekä kaksi vastaanotinta, joista toinen on suoraan säteen linjassa ja toinen pienessä kulmassa. Eri toteutustapoja on useita.



Kuva 2.3: Savukanavassa olevassa sirontamittaussauvassa on vasemmalla laser ja oikealla ilmaisimet, jotka mittaavat sekä suoran että sironneen valon intensiteettiä

Sirontamenetelmän heikkouksina voidaan pitää sironnan herkkyyttä hiukkasten koon ja heijastavuuden muutoksille. Lisäksi mittausmatka on vain 5–15 cm, joten mittauksen edustavuus jää melko pieneksi. Toisaalta prosessi on pääsääntöisesti mittauksen kannalta riittävän tasainen, eikä ongelmia yleensä ole.

Valaisimena sirontamittarissa, kuten muissakin optisissa hiukkasmittauslaitteissa, voidaan käyttää tavallista hehkulamppua, lediä, laseria, UV- ja IR-valoa. IR:n

kanssa ongelmia aiheuttaa savun oma lämpösäteily, UV:n kanssa piipun värinä. Työturvallisuussyistä käytetään yleensä näkyvää valoa, koska muuten asentaja saattaisi huomaamattaan katsoa valolähteeseen ja vaurioittaa silmänsä.

Luku 3

Optinen hiukkasmonitorointi

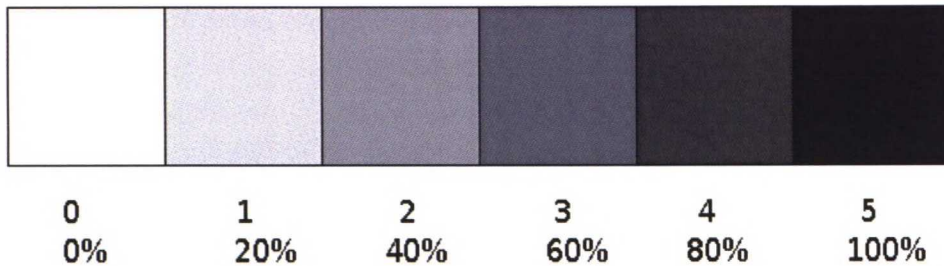
Tässä luvussa esittelen ensin optisesta hiukkasmonitoroinnista opasiteettimittauksen ja sen jälkeen skintillaatiomittauksen. Koska skintillaatiomenetelmä perustuu vahvasti opasiteettimenetelmään, on perusteltua käsitellä sitäkin laajasti. Menetelmien yhteyttä kuvaa myös se, että samat mittalaitteet käyvät molempiin menetelmiin, vain mittaus-tiedon käsittely ja tulkinta eroavat toisistaan. Luvun lähteinä on käytetty (Martin, 1994), (Födisch, 2004) ja (Mishchenko *et al.*, 2002).

3.1 Opasiteettihiukkasmittaus

Opasiteetti (*engl. opacity*) tarkoittaa sameutta tai läpikuultamattomuutta. Se on silmällä havaittavissa oleva suure, ja siksi varhaisin tapa tutkia päästöjä onkin ollut savun sameuden arviointi.

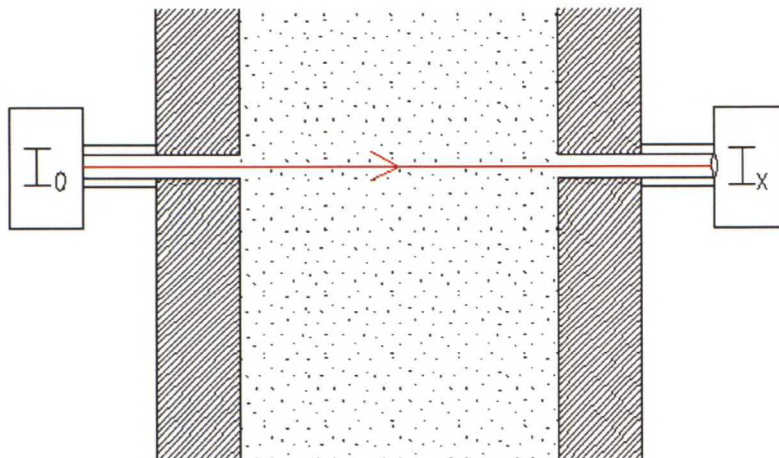
Sameuden arvioinnissa voidaan käyttää apuvälineenä esimerkiksi kuvassa 3.1 esiteltyä Ringelmannin asteikkoa. Asteikon tasot kuvaavat läpinäkymättömyyttä: 0-taso tarkoittaa 100 % läpäisyä ja taso 5 täydellistä pimennystä.

Opasiteettimittauksessa on kaksi erilaista käytäntöä. Yleensä mittaustuloksena pitää kertoa hiukkaspitoisuus yksikössä mg/m^3 , jolloin optinen opasiteettisuure on kalibroitava massa-asteikolla. Yhdysvalloissa, Kanadassa ja muutamissa muissa maissa ympäristöviranomaiset puolestaan vaativat, että mittaustulos pitää antaa nimenomaisesti opasiteettina. Tästä syystä moni valmistaja tekee joko erilliset laitteet eri alueille tai lisää laitteisiinsa ominaisuuden näyttää tulos molemmilla tavoilla.



Kuva 3.1: Ringelmannin asteikko (ylempi luku) ja opasiteettiprosentti (alempi luku)

Hiukkaspäästömittaus opasiteettimenetelmällä perustuu lähtevän ja savukaasun läpi kulkevan valon intensiteettien vertaamiseen. Kuvassa 3.2 on esitetty ns. single-pass -menetelmä (SP), jossa lähetin ja vastaanotin ovat eri puolilla kanavaa. Siinä valonsäde läpäisee savukaasun kerran. Ns. double-pass -mittauslaitteessa (DP) lähetin ja vastaanotin ovat samalla puolella piippua, vastapuolella on vain heijastin.



Kuva 3.2: Hiukkaskonsentraation optinen mittaaminen savupiipussa (single-pass)

DP-menetelmässä säteen kulkumatka on kaksinkertainen SP:iin verrattuna ja siksi sen herkkyys on teoriassa kaksinkertainen. DP:n toinen etu on nollatason tarkistamisen helppous: koska lähetin ja vastaanotin ovat vierekkäin samalla puolella piippua, riittää, että säde vain heijastetaan suoraan lähettimestä vastaanottimeen ilman, että sitä tarvitsisi viedä toista kanavaa pitkin vastaanottimelle.

DP:n virhettä lisää se, että valo heijastuu varsinaisen heijastimen lisäksi hiukkasista itsestään ja kanavan takaseinästä.

3.1.1 Edut ja heikkoudet

Opasiteettimittauksen yksi etu on siinä, että menetelmä ei edellytä laitteiston joutumista kosketuksiin savun kanssa. Tästä syystä savukanavan sisälle ei tarvitse asentaa mitään. Tämä myös helpottaa laitteen asennusta ja huoltoa.

Matalimpana pitoisuutena, jota SP-mittarilla voidaan mitata, pidetään MIP Electronics Oy:n kokemuksiin perustuen $20 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}/\text{m}$. Jos siis mittausmatka on esimerkiksi 4 m, täytyy pitoisuuden olla vähintään $5 \text{ mg}/\text{m}^3$, jotta mittaustulos olisi luotettava. Koska mittauksesta annetut määräykset ovat tiukentuneet, tämä herkkyys ei aina täytä vaatimuksia.

3.1.2 Opasiteettihiukkasmittauksen teoriaa

Hiukkasmittauksessa opasiteettiprosentti määritellään vaimentuneen ja vastaanotetun valon intensiteettien suhteeksi:

$$O = \frac{I_0 - I_x}{I_0} \cdot 100 \% = \left(1 - \frac{I_x}{I_0}\right) \cdot 100 \%, \quad (3.1)$$

missä

I_x on vastaanotetun (läpäisevän) säteen intensiteetti,

I_0 on lähtevän säteen intensiteetti.

Lambert-Beerin lain mukaisesti valonsäteen intensiteetti alenee väliaineessa eksponentiaalisesti:

$$I_x = I_0 \cdot e^{-k \cdot c \cdot l}, \quad (3.2)$$

missä

k on vaimennuskerroin,

c on hiukkaskonsentraatio ja

l on säteen kulkumatka savukaasussa.

Vaimennuskerroin k riippuu mm. savun hiukkasten muodosta, koosta, väristä, huokoisuudesta ja pintarakenteesta, siksi se on ominainen kullekin savutyypille sekä poltoprosessille, -aineelle ja -teholle. Koska läpäisevyys on kahden intensiteetin suhde $T = I_x/I_0$, täytyy k tuntea, jotta läpäisevyydestä saatiin laskettua konsentraatio.

k voidaan määrittää likiarvokaavalla tai savunäytteen laboratoriomittauksella. Kun k on selvitetty, hiukkaskonsentraatio c voidaan ratkaista kaavasta (3.2) muotoon:

$$c = \frac{\ln \frac{I_0}{I_x}}{k \cdot l}. \quad (3.3)$$

Tässä lähestymistavassa oletetaan, että vakio k on riippumaton aallonpituudesta λ . Approksimaatiolla saadaan luotettavia tuloksia, jos hiukkasen koko on vähintään aallonpituuden kolmasosan luokkaa. Mikäli mitattavana on tätä pienempiä hiukkasia ($d_h < 150$ nm), malli ei enää päde ja tulokset ovat lähinnä suuntaa-antavia. Menetelmää ei siis voi suoraan käyttää ultrapienien hiukkasten ($d_h < 100$ nm) mittaamiseen.

Läpäisevyyttä voidaan tarkastella myös yksittäisten hiukkasten lähtökohdasta. Oletetaan lasersäde homogeeniseksi poikkileikkauksen suhteen ja hiukkanen sellaiseksi, että se absorboi tai sirottaa kaiken säteilyn poikkileikkauksensa alalla. Tällöin läpäisevän intensiteetin suhteellinen muutos on hiukkasen i poikkileikkauksen pinta-alan $A_{h,i}$ ja säteen poikkileikkauksen pinta-alan A_s suhde.

$$\frac{I_0 - I_{x,i}}{I_0} = \frac{A_{h,i}}{A_s} \quad (3.4)$$

Tässä $I_{x,i}$ on läpäisevä intensiteetti, kun säteen edessä on vain hiukkanen i . Läpäiseväksi intensiteetiksi saadaan johdettua

$$I_{x,i} = I_0 \cdot \left(1 - \frac{A_{h,i}}{A_s}\right) \quad (3.5)$$

Kun hiukkasia on n kpl, saadaan läpäiseväksi intensiteetiksi

$$I_x = I_0 \cdot \left(1 - \frac{A_{h,1}}{A_s}\right) \cdot \left(1 - \frac{A_{h,2}}{A_s}\right) \cdot \dots \cdot \left(1 - \frac{A_{h,n}}{A_s}\right) = I_0 \cdot \prod_{i=1}^n \left(1 - \frac{A_{h,i}}{A_s}\right) \quad (3.6)$$

Käytännön opasiteettimittauksissa lasketaan tietyn aikavälin yli keskiarvoistettua intensiteettiä.

Usein käytetään optista tiheyttä D :

$$D = -\log_{10} T \quad (3.7)$$

Yhdistämällä kaavat (3.3) ja (3.7) saadaan optiselle tiheydelle D ja hiukkaskonsentraatiolle c lineaarinen yhteys

$$c = \frac{D}{k \cdot l \cdot \log_{10} e} \approx \frac{D}{k \cdot l \cdot 0,43}. \quad (3.8)$$

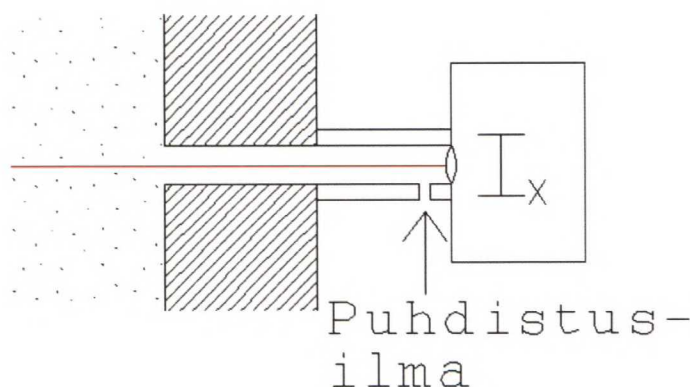
Koska D on suoraan verrannollinen hiukkaskonsentraatioon, sitä käytetään yhtenä mittaavana suureena.

3.1.3 Teknisiä ratkaisuja ja ongelmia

Vastaanottimen linssi pyritään suojaamaan savukontaktilta, sillä jos linssi joutuu kosketuksiin savun kanssa, se likaantuu ja sen läpinäkyvyys pienenee. Samentunut linssi vaikuttaa kokonaisopasiteettiin, joten linssin likaantumisaste pitää selvittää, muussa tapauksessa opasiteettimittauksen tulos vääristyy. Yleensä tämä onnistuu vain vertaamalla nollatasoon, mikä edellyttää polttoprosessin keskeytymistä. Yksi ratkaisu on ohjata referenssivalo linssille optista kuitua pitkin ja mitata, paljonko valo vaimenee linssissä.

Mittalaitteiden suojaaminen savukaasukosketukselta on tärkeää myös siitä syystä, että kanavassa kulkeva savu on hyvin kuumaa ja siinä on useita happoja. Hapot saattavat vaurioittaa mittauselektroniikkaa, ja savun kosteus voi tiivistyä koteloon.

Yleensä linssi suojataan siten, että mittausyhteeseen puhalletaan puhdistusilmaa kuvan 3.3 mukaisesti. Paine saa aikaan ilmavirtauksen yhteessä kohti piippua pois vastaanotimesta. Näin savun hiukkaset eivät pääse likaamaan linssiä.



Kuva 3.3: Mittausyhteeseen puhallettava puhdistusilma suojaa linssiä savukontaktilta

3.1.4 Kalibrointi

Opasiteettimittari antaa nimensä mukaisesti tuloksen opasiteettina. Jotta mittarista voitaisiin lukea tulos hiukkaskonsentraationa, on asteikko ensin kiinnitettävä. Kiinnitys tehdään osana mittarin kalibrointia, jossa määritellään mittarin nollataso (zero) ja asteikon kulmakerroin (span). Nollataso tarkoittaa mittarin ilmoittamaa tasoa, kun mittausmatkalla ei ole hiukkasia.

Laitokselle annettava ympäristölupa sisältää yleensä tarkemmat määräykset kalibroinnin suorittamisesta. EU:ssa mittari pitää kalibroida asennuksen yhteydessä ja sen jälkeen 3–5 vuoden välein. Kalibrointi pitää tehdä näytteistysmenetelmällä ja sen voi suorittaa vain sertifioitu auditoija. Jos polttoprosessia muutetaan, mittari pitää kalibroida.

Opasiteettia mitattaessa riittää, että mittarista kiinnitetään 0 % ja 100 % opasiteettitasot.

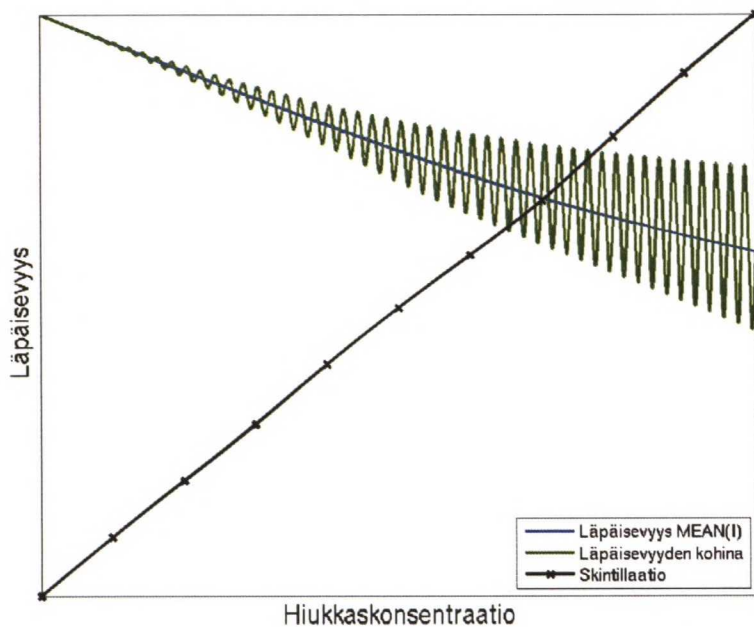
Yhdysvalloissa kalibrointi pitää tehdä neljännesvuosittain, mutta siihen ei tarvita ulkopuolista auditoijaa, vaan sen voi tehdä itse. Lisäksi kalibrointiin riittää siellä näytteistysmenetelmän sijaan standardoitu suodatinlinssi, johon mittarin antamaa tuloa verrataan.

3.2 Skintillaatio

Kun läpäisevyyttä tarkastellaan ajan suhteen tarkemmin, huomataan että hiukkasmäärässä tapahtuu vaihtelua. Hiukkasia tulee ja menee säteen eteen satunnaisesti ja riippumattomasti, keskimäärin niitä on yhtä paljon. Osoittautuu, että tämä vaihtelun voimakkuus korreloi hiukkaskonsentraation kanssa. Esittelen teoreettisen tarkastelun tässä luvussa.

Siinä missä läpäisevyys kuvaa säteen edessä olevien hiukkasten määrän keskiarvoa, skintillaatiomenetelmässä siihen verrataan kohinaa, jonka hiukkasmäärään vaihtelu aiheuttaa. Kun signaalia keskiarvoistetaan, menetetään tämän kohinan sisältämä informaatio. Jotta mittauksiin saataisiin enemmän tarkkuutta, on mittausdataa hyödynnettävä paremmin.

Kuvassa 3.4 on esitetty periaatetasolla läpäisevyyden ja sen kohinan yhteys hiukkaskonsentraatioon.



Kuva 3.4: Hiukkaskonsentraation kasvaessa läpäisevyys pienenee eksponentiaalisesti, samalla läpäisevän intensiteetin kohina kasvaa.

Chen *et al.* (1998b) johtavat läpäisevälle intensiteetille I_x odotusarvon $E[I_x]$ ja varianssin $D[I_x]$. Johtamisessa on oletettu, että lasersäde on homogeeninen ja hiukkanen absorboi tai sirottaa kaiken siihen osuvan säteilyn. Lisäksi on oletettu, että hiukkasmäärä säteen tilavuudessa on Poisson-jakautunut. Odotusarvoksi saadaan

$$E[I_x] = I_0 e^{-N \cdot A_s \cdot l \cdot m_x}, \quad (3.9)$$

missä

N on keskimääräinen hiukkastiheys (kappalemäärä tilavuudessa)

A_s on säteen poikkipinta-ala

l on säteen kulkumatka savukaasussa

m_x on hiukkasten poikkipinta-alan odotusarvon ja säteen poikkipinta-alan suhde $\frac{E[A_h]}{A_s}$.

Kaavasta (3.9) voidaan huomata, että $N \cdot A_s \cdot l$ tarkoittaa hiukkasmäärän keskiarvoa säteen tilavuudessa.

Vastaavasti varianssi on

$$D[I_x] = E[I_x^2] - (E[I_x])^2 = (E[I_x])^2 (e^{NA_s l (\sigma_x^2 + m_x^2)} - 1), \quad (3.10)$$

missä σ_x^2 on hiukkasen poikkileikkauksen varianssin ja säteen poikkipinta-alan neliön suhde

$$\sigma_x^2 = \frac{D[A_h]}{A_s^2}. \quad (3.11)$$

Merkitään kaavan (3.10) eksponenttia $Z = NA_s l (\sigma_x^2 + m_x^2)$. Soveltamalla Taylorin sarjakehitelmää voidaan eksponenttifunktio kirjoittaa nyt muotoon

$$e^Z = 1 + Z + \frac{Z^2}{2!} + \frac{Z^3}{3!} \dots$$

Sijoittamalla Z :n lausekkeeseen polttoprosessille tyypilliset arvot $N = 4 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{m}^3}$, $A = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$, $l = 1 \text{ m}$, $\sigma_x^2 = 3 \cdot 10^{-12}$ ja $m_x^2 = 7 \cdot 10^{-13}$ saadaan

$$Z \approx 7,4 \cdot 10^{-10}.$$

Koska $Z \ll 1$, eksponenttifunktio voidaan kirjoittaa

$$e^{NA_s l (\sigma_x^2 + m_x^2)} \approx 1 + NA_s l (\sigma_x^2 + m_x^2)$$

ja kaava (3.10) muodossa

$$D[I_x] = (E[I_x])^2 NA_s l (\sigma_x^2 + m_x^2). \quad (3.12)$$

Merkitsemällä $\sigma_x = \frac{\sigma}{A_s}$ ja $m_x = \frac{m}{A_s}$ saadaan kaava muotoon

$$D[I_x] = (E[I_x])^2 (\sigma^2 + m^2) \frac{Nl}{A_s}. \quad (3.13)$$

Ratkaisemalla kaavasta hiukkastiheys N saadaan

$$N = \frac{D[I_x]}{(E[I_x])^2} \cdot \frac{A_s}{l \cdot (\sigma^2 + m^2)}. \quad (3.14)$$

Hiukkaskonsentraatio c on hiukasmäärän N ja yhden hiukkasen keskimääräisen massan $\overline{m_h}$ tulo

$$c = N \cdot \overline{m_h}. \quad (3.15)$$

Nyt hiukkaskonsentraatioksi saadaan

$$c = \frac{D[I_x]}{(E[I_x])^2} \cdot \frac{\overline{m_h} \cdot A_s}{l \cdot (\sigma^2 + m^2)}. \quad (3.16)$$

Merkitään vakiokerrointa K :lla, saadaan

$$c = \frac{D[I_x]}{(E[I_x])^2} \cdot K. \quad (3.17)$$

Kun sijoitetaan aiemmin käytetyt arvot sekä $\overline{m_h} = 2,5 \cdot 10^{-14}$ kg, saadaan K :lle suuruusluokaksi

$$K = 1400 \cdot 10^6 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}.$$

Tässä pitää ottaa huomioon, että K on riippuvainen savun ominaisuuksista, samoin kuin kaavassa (3.2) esiintyvä vaimennuskerroin k .

Intensiteetti I_x on mitattava arvo, A_s ja l piipun ja säteen mittoja sekä m ja σ hiukasten kokojakaumaan liittyviä tunnuslukuja. Tarkempi johtaminen on esitettyä artikkelissa (Chen *et al.*, 1998b).

Varianssin ja keskiarvon tilastollinen yhteys aiheuttaa sen, että linssin likaantuessa varianssi ja keskiarvon neliö vaimenevat samassa suhteessa. Chen *et al.* (1998a) kertoo pölymittauksen testauksesta, jossa linssin annettiin likaantua niin, että sen läpäisevä intensiteetti oli vain 4 % alkuperäisestä. Siitä huolimatta mittausvirhe jäi alle 10 %:in.

3.2.1 Instrumenttikohinan vaikutus skintillaatioon

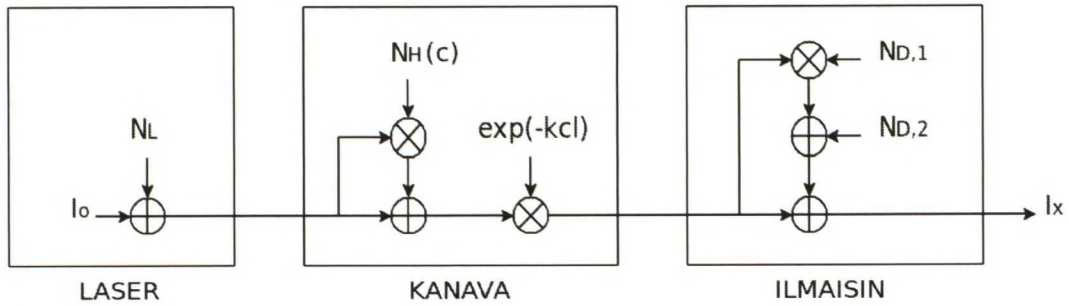
Koska skintillaatiomenetelmässä mitataan kohinaa, jonka savukaasun hiukkaset aiheuttavat läpäisevään intensiteettiin, on tärkeää selvittää kohinasta instrumenttikohinan osuus. Tätä varten johdin menetelmän, jolla stabiili virhekohina saadaan eliminoitua lopputuloksesta.

Merkitään skintillaatiomenetelmällä laskettua hiukkaskonsentraatiota \hat{c} :lla.

$$\hat{c} = c + c_N, \quad (3.18)$$

missä c_N on instrumenttikohina, joka näkyy hiukkaskonsentraationa. c_N on siis virhe, joka pitää selvittää.

Kuvassa 3.5 on esitettyä ilmaisimen ulostulojännitteeseen syntyvä kohina.



Kuva 3.5: Kohinan kertyminen mittaussignaaliin laserissa, kanavassa ja ilmaisimessa

Laserilla on oma vakiokohinansa N_L , joka riippuu lähinnä vallitsevasta lämpötilasta. Kanavassa valon intensiteetti pienenee $e^{-k \cdot c \cdot l}$ -kertaiseksi, ja siihen summautuu skintillaatiokohina $N_H(c)$, joka on konsentraation c funktio. Funktiota ei ole tarpeen selvittää, koska olennaista on se, miten kohina esiintyy signaalissa I_x . Ilmaisimen kohina $N_{D,1}$ on suoraan verrannollinen ilmaisimpiirin virtaan, joka puolestaan on verrannollinen valon intensiteettiin. Lisäksi ilmaisimella ja vahvistimella on oma peruskohinansa $N_{D,2}$. Kaaviosta saadaan johdettua läpäiseväksi intensiteetiksi kohinoineen

$$I_x = N_{D,2} + \left[(1 + N_{D,1}) \cdot e^{-k \cdot c \cdot l} \cdot (1 + N_H(c)) \right] \cdot (I_o + N_L) \quad (3.19)$$

Kun huomioidaan, että signaalin kohinan suuruus on melko pientä signaalin keskiarvoon nähden, voidaan kohinoiden tulot approksimoida nolllaksi. Näin kaava (3.19) voidaan kirjoittaa auki

$$I_x \approx e^{-k \cdot c \cdot l} \cdot I_o \cdot N_H(c) + e^{-k \cdot c \cdot l} \cdot N_L + e^{-k \cdot c \cdot l} \cdot I_o \cdot N_{D,1} + N_{D,2} + e^{-k \cdot c \cdot l} \cdot I_o \quad (3.20)$$

Jos oletetaan, että kohina on symmetristä ja sen keskiarvo on nolla, on läpäisevän intensiteetin keskiarvo

$$E[I_x] = I_o \cdot e^{-k \cdot c \cdot l} \quad (3.21)$$

Oletusta voidaan pitää pätevänä, koska jos laserin ryömintänopeus on aikavakion luokkaa, muutos nollautuu mittaustuloksessa samalla tavoin kuin linssin likaantuminen.

Vastaavasti varianssi voidaan laskea jäljelle jääneistä termeistä

$$D[I_x] = D[e^{-k \cdot c \cdot l} \cdot I_o \cdot N_H(c) + e^{-k \cdot c \cdot l} \cdot N_L + N_{D,2} + e^{-k \cdot c \cdot l} \cdot I_o \cdot N_{D,1}] \quad (3.22)$$

Koska kohinasignaalit ovat korreloimattomia, voidaan kustakin termistä ottaa varianssi ja summata ne.

$$\begin{aligned} D[I_x] &= D[N_H(c)] \cdot e^{-2 \cdot k \cdot c \cdot l} \cdot I_o^2 \\ &+ D[N_L] \cdot e^{-2 \cdot k \cdot c \cdot l} \\ &+ D[N_{D,2}] \\ &+ D[N_{D,1}] \cdot e^{-2 \cdot k \cdot c \cdot l} \cdot I_o^2 \end{aligned} \quad (3.23)$$

Kun sijoitetaan varianssi (3.23) ja keskiarvo (3.21) kaavaan (3.17), saadaan

$$\hat{c} = \underbrace{K \cdot D[N_H(c)]}_{\text{skintillaatio}} + \underbrace{K \cdot \frac{D[N_{D,2}]}{I_o^2 \cdot e^{-2 \cdot k \cdot c \cdot l}} + K \cdot \frac{D[N_L]}{I_o^2} + K \cdot D[N_{D,1}]}_{\text{instrumenttikohina}} \quad (3.24)$$

Jos instrumenttikohina oletetaan nolaksi, voidaan päätellä, että hiukkaskonsentraatio $c = K \cdot D[N_H(c)]$. Näin kaava (3.24) saadaan muotoon

$$\hat{c} = c + \underbrace{K \cdot \frac{D[N_{D,2}]}{I_o^2 \cdot e^{-2 \cdot k \cdot c \cdot l}}}_{\text{eksp. virhe}} + \underbrace{K \cdot \frac{D[N_L]}{I_o^2} + K \cdot D[N_{D,1}]}_{\text{vakiovirhe}} \quad (3.25)$$

Instrumenttikohina voidaan jakaa eksponentiaaliseen virheeseen $K \cdot \frac{D[N_{D,2}]}{I_o^2} \cdot e^{2 \cdot k \cdot c \cdot l}$ ja vakiovirheeseen $K \cdot (\frac{D[N_L]}{I_o^2} + D[N_{D,1}])$

Jos oletetaan, että instrumenttikohina pysyy vakiona, voidaan sen vaikutus eliminoida mittaustuloksesta. Sammutetaan laser tai pimennetään linssi ja mitataan ilmaisimen kohinataso N_0 . Kun hiukkastaso on nollassa, on laserin läpäisyintensiteetti maksimissaan ja tällöin myös vastaanottimen instrumenttikohina huipussaan. Mitataan tämä pölyttömän kanavan läpäisyintensiteetti I_t .

Näin mittaustuloksesta voidaan poistaa vakiovirhetekijät.

$$c = \hat{c} - c_N = K \cdot \left[\frac{\text{Var}(I_x) - \text{Var}(N_0)}{I_x^2} - \frac{\text{Var}(I_t)}{I_t^2} \right] \quad (3.26)$$

3.2.2 Skintillaation numeerinen laskenta

Tarkan otoskeskiarvon ja -varianssin laskenta vaatii yhtä monta muistipaikkaa, kuin otoksen pituus on. Laskutehontarpeen minimoimiseksi johdin estimaattorit liukuvalla keskiarvolle ja varianssille.

Alkion $x_{(i)}$ ja $n - 1$ sitä edeltävän alkion keskiarvo on

$$\overline{x_{(i)}} = \frac{\sum_{j=0}^{n-1} x_{(i-j)}}{n} = \frac{\overbrace{x_{(i)} + x_{(i-1)} + \dots + x_{(i-(n-2))} + x_{(i-(n-1))}}^n}{n}. \quad (3.27)$$

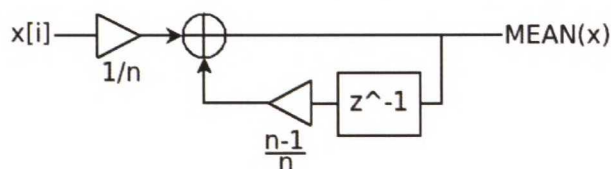
Estimoidaan jokainen alkio keskiarvon suuruiseksi:

$$\widehat{x_{(i)}} = \frac{\overbrace{\overline{x_{(i)}} + \overline{x_{(i)}} + \dots + \overline{x_{(i)}} + \overline{x_{(i)}}}^n}{n} = \frac{n \cdot \widehat{x_{(i)}}}{n}. \quad (3.28)$$

Tästä saadaan estimaatti liukuvaksi keskiarvoksi

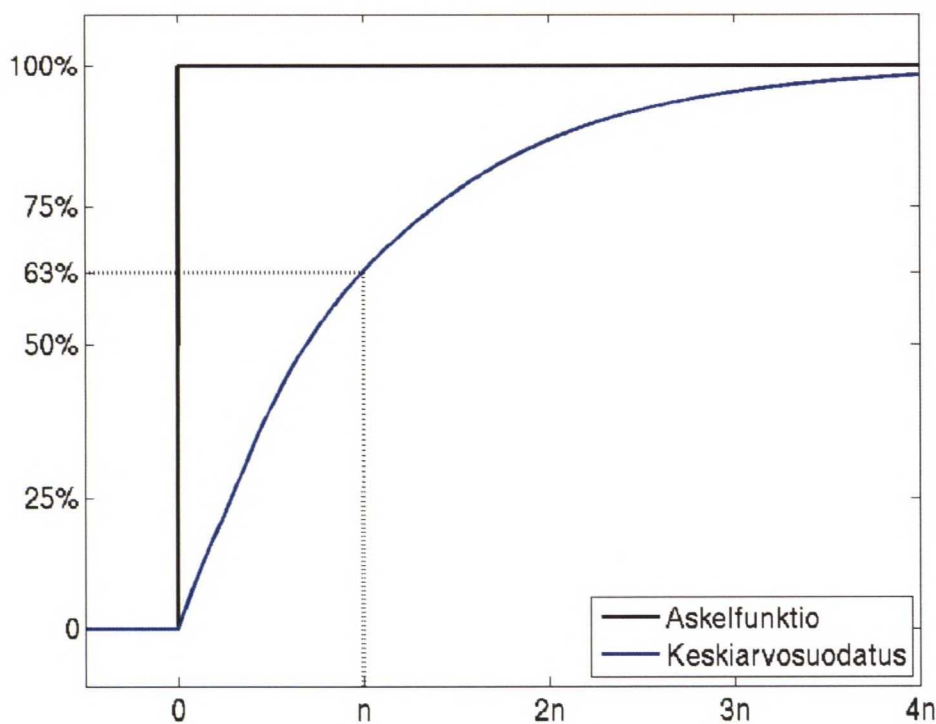
$$\widehat{x_{(i)}} = \frac{n-1}{n} \widehat{x_{(i-1)}} + \frac{1}{n} x_{(i)}. \quad (3.29)$$

Käytännössä tämä on ensimmäisen asteen IIR-suodatin, esitettynä kuvassa 3.6.



Kuva 3.6: Keskiarvoistava IIR-suodatin

Suodattimen aikavakio $\tau = n$ eli askelvaste saavuttaa 63 % muutoksesta n näytteessä, kuten kuvassa 3.7 näkyy.



Kuva 3.7: Keskiarvosuodattimen askelvaste

Varianssiestimaattori määritellään suurelta osin samalla periaatteella. Määritellään otosvarianssi

$$\text{Var } x_{(i)} = \frac{\sum_{j=0}^{n-1} (x_{(i-j)} - \bar{x}_{(i)})^2}{n-1}. \quad (3.30)$$

Approksimoidaan jokaisen keskiarvopoikkeaman neliö yhtä suureksi ja merkitään sitä

apumuuttujalla $\Delta_{(i)}$

$$\Delta_{(i)} = \frac{\sum_{j=0}^{n-1} (x_{(i-j)} - \bar{x}_{(i)})^2}{n}. \quad (3.31)$$

Lasketaan varianssiestimaatti edellisellä approksimaatiolla

$$\widehat{\text{Var}} x_{(i)} = \frac{n \cdot \Delta_{(i)}}{n-1} \quad (3.32)$$

$$\Rightarrow \Delta_{(i)} = \frac{n-1}{n} \widehat{\text{Var}} x_{(i)} \quad (3.33)$$

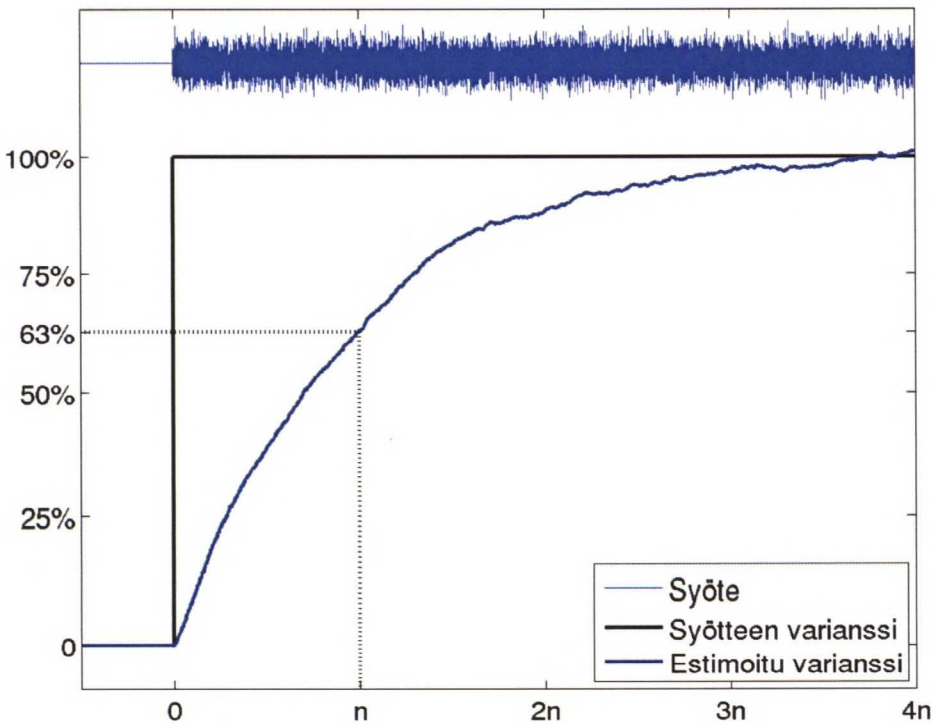
$$\Rightarrow \Delta_{(i-1)} = \frac{n-1}{n} \widehat{\text{Var}} x_{(i-1)}. \quad (3.34)$$

Saadaan varianssiestimaattori, jonka laskemiseen käytetään edellistä arvoa

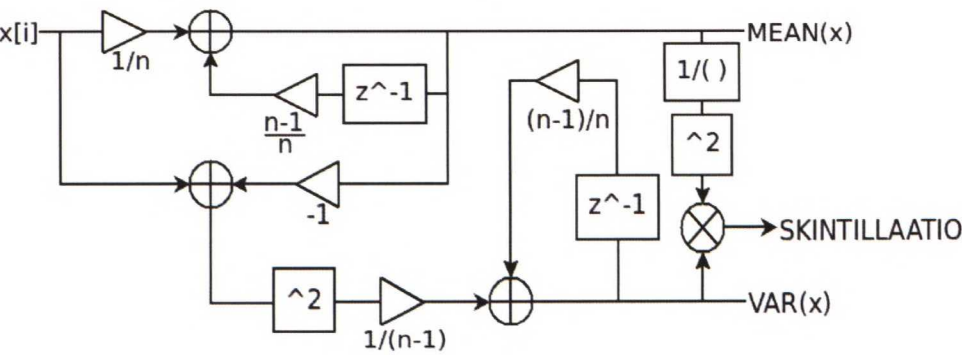
$$\begin{aligned} \widehat{\text{Var}} x_{(i)} &= \Delta_{(i-1)} + \frac{(x_{(i)} - \bar{x}_{(i-1)})^2}{n-1} \\ &= \frac{n-1}{n} \widehat{\text{Var}} x_{(i-1)} + \frac{(x_{(i)} - \widehat{x}_{(i)})^2}{n-1}. \end{aligned} \quad (3.35)$$

Myös varianssiestimaattori saavuttaa kuvan 3.8 mukaisesti 63 % muutoksesta n näytteessä.

Jakamalla varianssiestimaatti keskiarvoestimaatin neliöllä saadaan skintillaatio, joka on suoraan verrannollinen hiukkaskonsentraatioon. Tämä on esitetty lohkokaaaviona kuvassa 3.9.



Kuva 3.8: Varianssiestimaattorin vaste. Syötteenä on gaussista kohinaa, kun $t > 0$.



Kuva 3.9: Numeerisen laskennan toteutus lohkokaaaviona

3.2.3 Virhelähteitä

Koska skintillaatiomenetelmässä verrataan mitattua kohinaa mitattuun keskiarvoon, menetelmä on hyvin herkkä virhekohinalle.

Savupiippu saattaa tärinästä voimakkaasti, ja siksi lasersäteen osumakohta ilmaisimel-

la voi vaihdella. Ilmaisimille määritellään hyvin tiukat toleranssit, ja ilmaisimen virran muutos on alle prosentin luokkaa valon osuessa eri paikkoihin ilmaisimella. Tästä huolimatta tärinä voi aiheuttaa signaaliin kohinaa. Ongelmaa voidaan osittain korjata isolla linssillä, joka taittaa valon samaan kohtaan ilmaisimella riippumatta osumakohdasta linssille.

Muuttuvat sääolot, kuten lämpötila ja kosteus, voivat aiheuttaa ryömintää. Toisaalta hidas ryömintä ei haittaa, jos kohina alenee samassa suhteessa. Tämä vastaa tilannetta, jossa linssi likaantuu.

3.2.4 Huomioita menetelmästä

Hiukkasmäärän kautta johdettu kaava (3.9) on hyvin lähellä Lambert-Beerin lain kautta saatua (3.2). Jos kaavat yhdistetään, päästään muotoon

$$E[A_h] \cdot N = k \cdot c, \quad (3.36)$$

josta voidaan johtaa

$$k = E[A_h] \frac{N}{c} = \frac{E[A_h]}{E[m_h]} = \frac{\pi \cdot E[r_h]^2}{\frac{4}{3} \pi \cdot E[r_h]^3 \cdot \rho} = \frac{3}{4 \cdot E[r_h] \cdot \rho}. \quad (3.37)$$

Luvussa 4 simulointiin käytetään arvoja $E[r_h] = 0,75 \mu\text{m}$ ja $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, näillä arvoilla saadaan $k = 1000 \text{ m}^2/\text{kg}$. Kun käytetään arvoja $c = 50 \text{ mg/m}^3$ ja $l = 1 \text{ m}$ saadaan

$$\frac{I_x}{I_0} = e^{-1000 \cdot 50 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 0,91,$$

joka on oikeaa suuruusluokkaa.

Luku 4

Opasiteettikohinan mallintaminen

4.1 Hiukkasmalli

Mallintamisessa on lähdetty siitä ajatuksesta, että yksittäinen hiukkanen aiheuttaa opasiteettiin kuvan 4.1 kaltaisen pulssin, jonka voimakkuus riippuu hiukkasen poikkipinta-alasta ja kesto hiukkasen nopeudesta sekä liikeradan sijainnista säteessä. Kun jokainen säteen edestä menevä hiukkanen aiheuttaa samanlaisen pulssin, on lopputuloksena kohinaa.

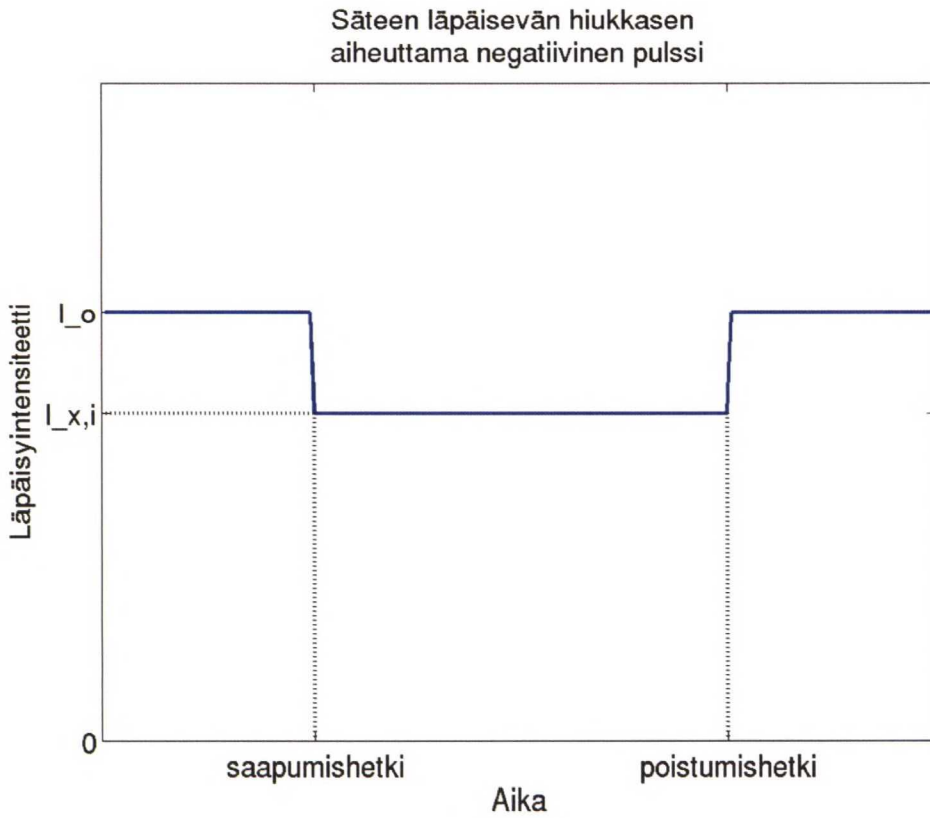
Hiukkasen kuluaika säteen poikki riippuu hiukkasen nopeudesta ja leikkauskohdasta sekä säteen halkaisijasta. Tyypillinen virtausnopeus piipussa on $v_i = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ja lasersäteen halkaisija 2,5 mm. Tästä saadaan suuruusluokaksi hiukkasen kuluajalle keskestä sädettä 100 μs . Koska hiukkanen voi osua säteessä mihin kohtaan tahansa, kulumatka säteen halki on

$$s = d_s \cdot \sqrt{1 - x^2},$$

missä $x \sim \text{Tas}[0, 1]$ eli x on tasajakautunut.

Hiukkasen massa on sen tilavuuden ja tiheyden tulo

$$m_h = \frac{\pi}{6} d_h^3 \cdot \rho_h, \tag{4.1}$$



Kuva 4.1: Yhden hiukkasen aiheuttama negatiivinen pulssi

josta saadaan hiukasmääräksi tilavuusyksikössä

$$\frac{n}{V} = \frac{c}{m_h}. \quad (4.2)$$

Kun tämä kerrotaan aikayksikössä säteen läpi kulkevan ilman tilavuudella, saadaan kaava säteen ohittavien hiukkasten lukumäärälle

$$\frac{n}{t} = \frac{c \cdot d_s \cdot d_p \cdot v_i}{m_h} = \frac{c \cdot d_s \cdot d_p \cdot v_i}{\frac{\pi}{6} d_h^3 \cdot \rho_h}. \quad (4.3)$$

Oletetaan, että hiukkasten materiaalin tiheys on sama kuin vedellä, $\rho_h = 1000 \text{ kg/m}^3$. Käytetään tyypillisillä arvoja, hiukaspitoisuus $c = 50 \text{ mg/m}^3$, laser-säteen halkaisija $d_s = 2,5 \text{ mm}$, piipun halkaisija $d_p = 1 \text{ m}$, hiukkasen keskimääräinen halkaisija $d_h = 1,5 \text{ }\mu\text{m}$ ja keskimääräinen virtausnopeus piipussa $v_i = 20 \text{ m/s}$. Näin saadaan hiukasmääräksi $1,5 \cdot 10^9$ hiukkasta sekunnissa.

Hiukkasten kokojakaumalle ei ole teoreettista mallia, mutta yleensä käytetään log-norm

-jakaumaa, koska mittauksissa on todettu, että yhdestä lähteestä peräisin olevien hiukkasten koko noudattelee tätä jakaumaa. Lisäksi jakauma on matemaattisesti helposti hallittava. (Hinds, 1999)

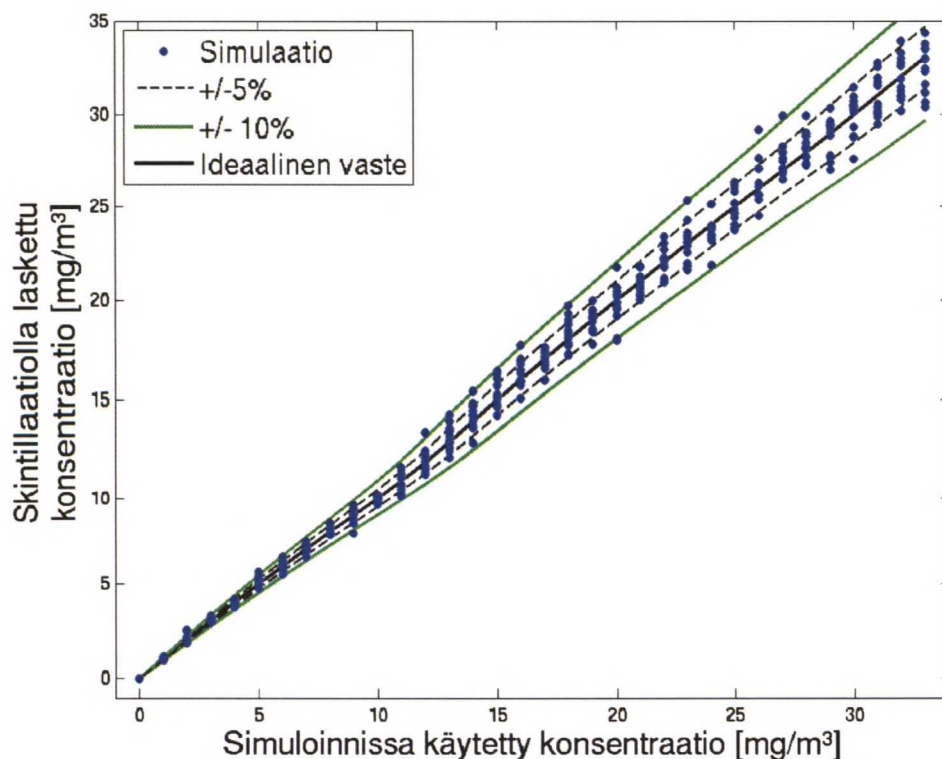
Mallissa on oletettu, että lasersäteen poikkileikkaus on homogeeninen ja hiukkasen aiheuttama intensiteetin vaimenema on riippumaton hiukkasen sijainnista säteessä. Mallissa ei myöskään oteta huomioon mahdollisia heijastumia, vaan intensiteetin aleneman oletetaan olevan suoraan verrannollinen hiukkasen poikkipinta-alaan. Matlab-mallinnuksen lähdekoodi on esitetty liitteessä A.

Simulaatiossa lasketaan em. mallia käyttäen hiukkasjoukon läpäissyt lasersäteiden intensiteetti tietyssä ajassa. Intensiteetistä lasketaan skintillaatiolla hiukkaskonsentraatio. Kertoimena käytetty K on puolestaan saatu simulaatiossa parametreinä käytetystä hiukkasjakaumasta. Skintillaation laskenta on esitetty kappaleessa 3.2.

Kuvassa 4.2 on laskettu skintillaatio 20 eri simulaatiolla, kun hiukkaskonsentraatio vaihteli välillä $1 - 30 \text{ mg/m}^3$. Tuloksia ei ole skaalattu, vaan konsentraatio on laskettu suoraan teorian mukaisesti. Kuvaajasta voidaan helposti havaita, että skintillaation ja hiukkaskonsentraation suhde on lineaarinen ja laskettu hiukkaskonsentraatio on hyvin tarkasti sama kuin parametrina käytetty konsentraatio.

4.2 Mallin toimivuus

Lambert-Beerin laki toimii lähtökohtaisesti vain pienillä pitoisuuksilla. Kun konsentraatio kasvaa riittävän suureksi, todellinen absorptio jää alle em. lain ennustaman arvon. Tämä johtuu siitä, että malli ei ota huomioon hiukkasten osumista päällekkäin. Käytännössä savupäästöjen hiukkaspitoisuudet ovat kuitenkin suurimmillaankin niin pieniä, ettei tästä epälineaarisuudesta koidu ongelmia.



Kuva 4.2: Eri hiukkaskonsentraatitasoilla simuloidusta intensiteettikohinasta skintillaatiolla laskettu hiukkaskonsentraatio, ideaalinen vaste tarkoittaa parametrina käytetyn konsentraation ja teorian ennustaman tason täydellistä vastaavuutta.

4.3 Muuta tarkastelua

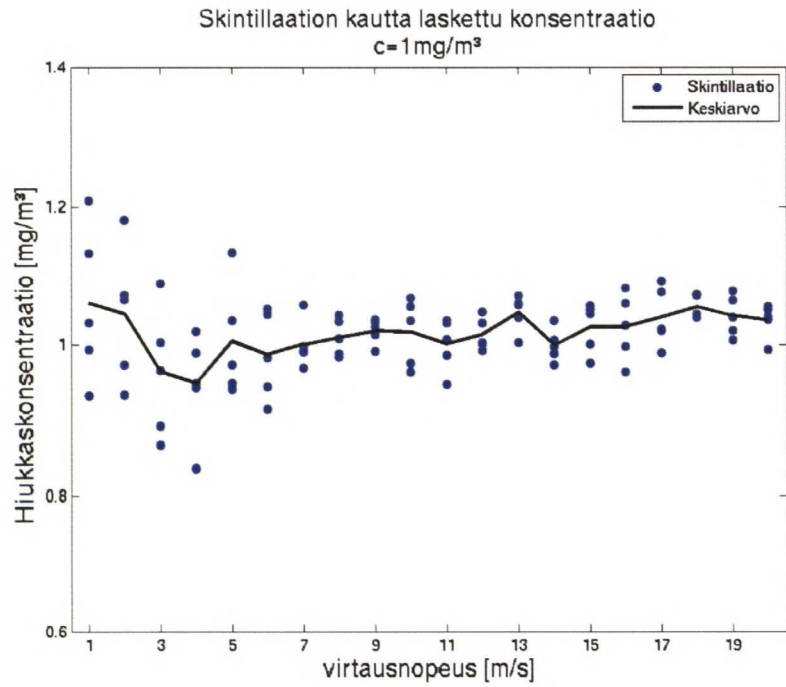
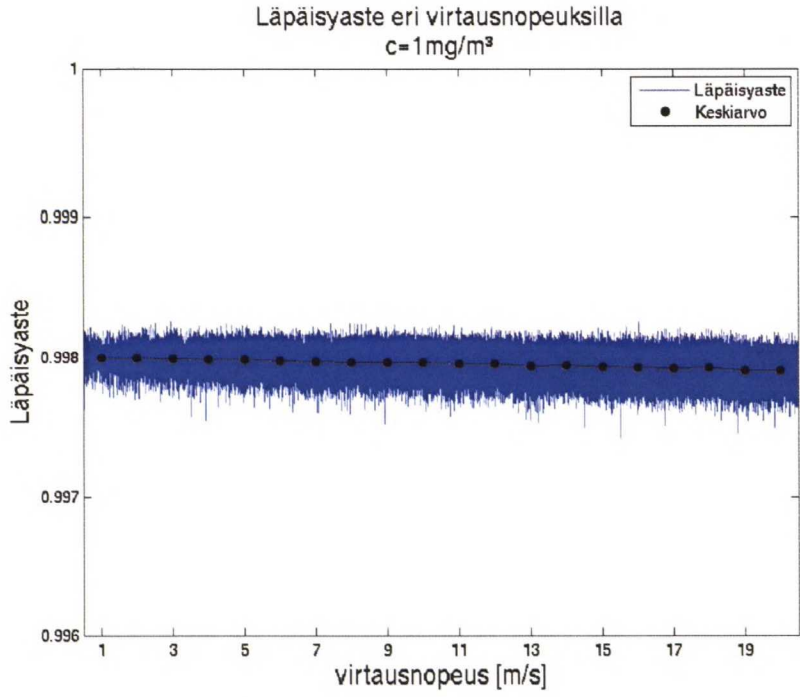
Opasiteettiin vaikuttaa säteen edessä olevien hiukkasten määrä ja niiden koko. Skintillaation laskemiseen tarvittava varianssi puolestaan riippuu määrän ja koon jakaumien muodosta. Kuvassa 4.3(a) on esitettyä simuloitua intensiteettikohinaa eri virtausnopeuksilla vakio-konsentraatiolla. Läpäisyasteessa on nähtävissä pieni laskeva suuntaus, mutta tämä johtuu lähinnä simulaation pyöristysvirheistä. Muutoksen suuruus on vain 0,01 %:n luokkaa.

Kuvassa 4.3(b) on edellisestä kohinasignaalista skintillaatiolla laskettu hiukkaskonsentraatio. Skintillaatiossa tapahtuu pientä variointia, joka johtuu lyhyistä näytejaksoista. Suuremmilla nopeuksilla samassa näytejaksossa säteen ohi menee enemmän hiukkasia, joten otos isompi. Siksi myös skintillaatio konvergoi. Eri virtausnopeuksilla laskettujen hiukkaskonsentraatioiden keskiarvo vaihtelee välillä $\pm 10\%$.

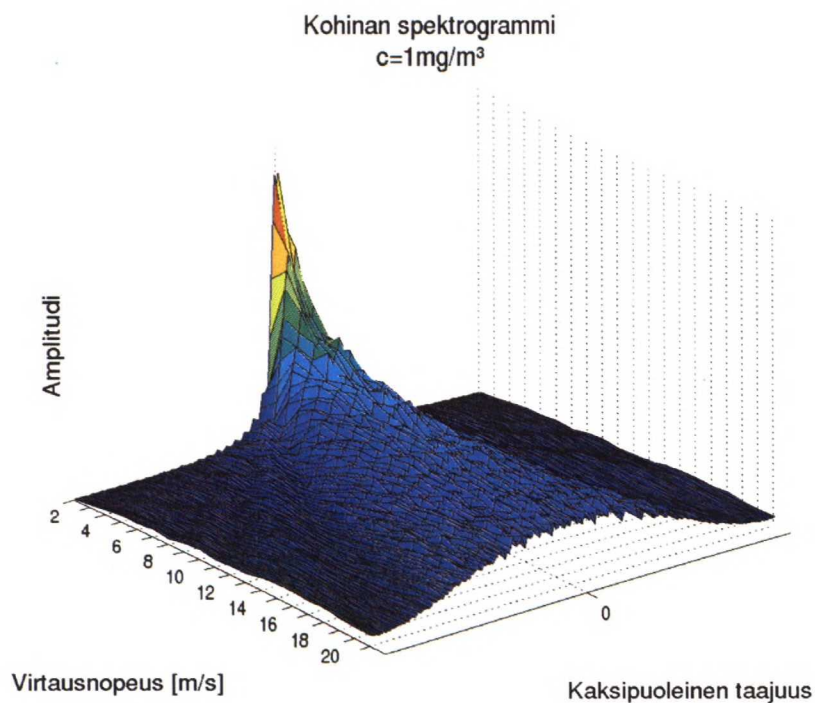
Kuvien tarkoituksena ei ole tarkastella menetelmän tarkkuutta, vaan riippumattomuutta virtausnopeudesta.

Tutkittaessa saman kohinan taajuusspektriä havaitaan, että matalalla nopeudella kohina on hyvin voimakasta ja kapeakaistaista (Kuva 4.4(a)). Kun nopeutta nostetaan, kaista leviää ja madaltuu. Kohinan energia säilyy kuitenkin vakiona. Jos nopeus pidetään vakiona ja muutetaan konsentraatiota, kohinan spektrin kaistanleveys pysyy vakiona mutta kohinan voimakkuus kasvaa eksponentiaalisesti (Kuva 4.4(b)).

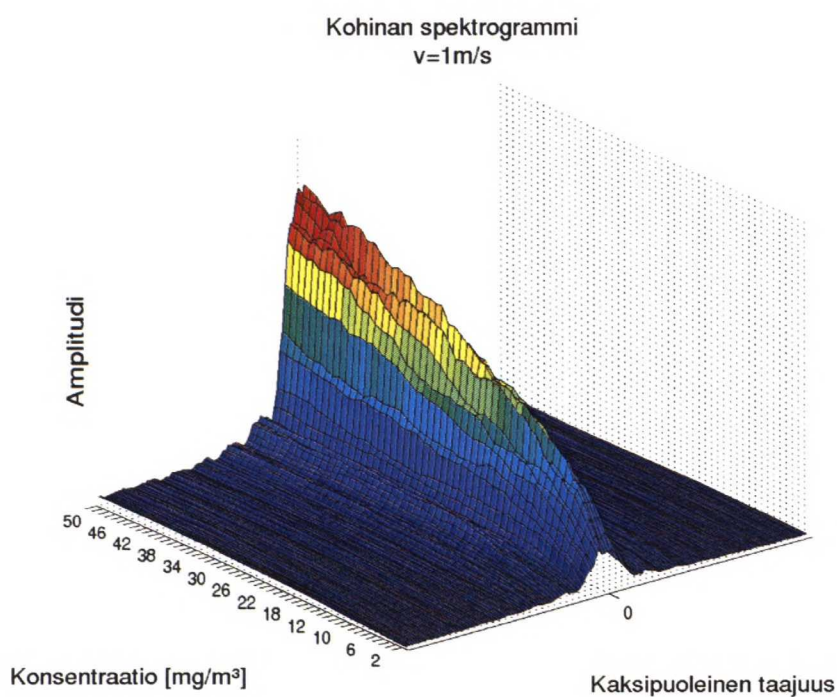
Vaikka kohinan taajuusominaisuuksia ei tässä työssä käsitellä tämän enempää, siinä on aihetta lisätutkimuksiin. Tämä kuitenkin edellyttää mittaukselta mm. suurempaa tarkkuutta.



Kuva 4.3: Simuloitua skintillaatiokohinaa (ylempi kuva) ja siitä skintillaatiolla laskettu hiukkaskonsentraatio (alempi kuva) eri virtausnopeuksilla (1 – 20 m/s), kun konsentraatio on vakio (1 mg/m^3)



(a)



(b)

Kuva 4.4: Simuloidun kohinan taajuusanalyysi vakiokonsentraatiolla (ylempi kuva) ja -virtausnopeudella (alempi kuva)

Luku 5

Laboratoriomittauksen laitteisto

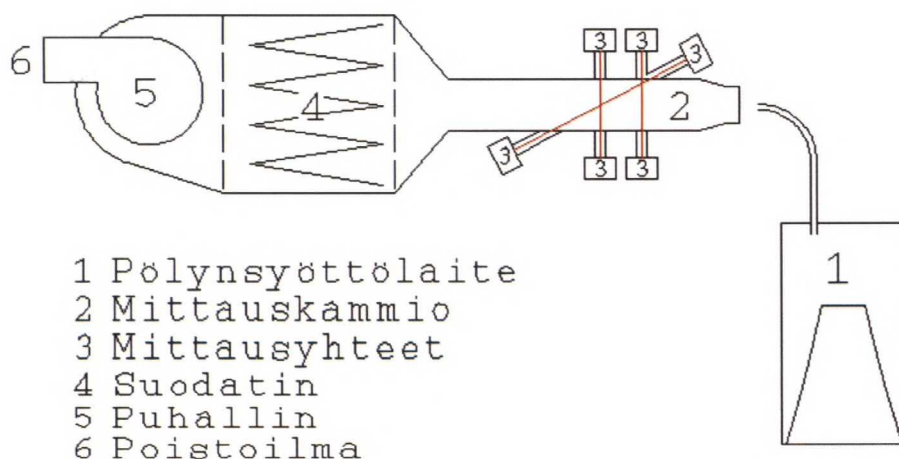
5.1 Mittausjärjestelyt ja -kytkennät

Skintillaation tutkimista varten MIP Electronics Oy:n toimitiloihin rakennettiin mitta-laite, jolla ilmiötä voitiin tarkastella laboratorio-oloissa. Vaikka vastaavaa mittalaitetta ei yrityksellä ole aikaisemmin ollut, voitiin mittauksessa hyödyntää vanhempia opasi-teettimittareita. Laitteiston rakennekaavio on esitettynä kuvassa 5.1.

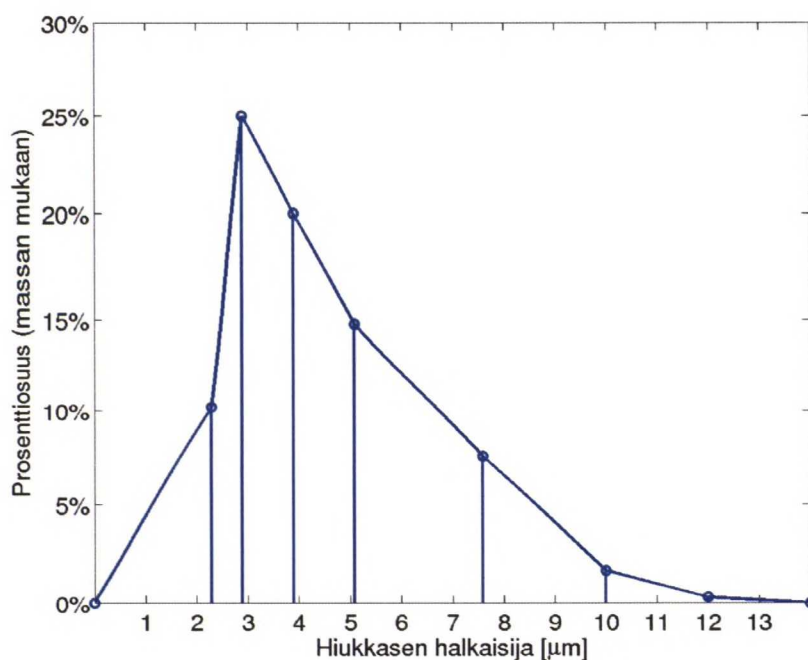
Luotettavan mittaustuloksen saavuttamiseksi pölyn syötön tulee olla mahdollisimman tasaista. Kaaviossa ensimmäisenä on pölyn-syöttölaite (1) (myös kuvassa 5.7), joka on iso lieriö, jonka pohjalla on kartio. Lieriöön puhalletaan reunan suuntainen paineilma-suihku pohjalle vaakasuoraan, tämä nostaa pölyn ilmaan ja saa sen kiertämään säiliötä. Pohjalla olevan kartion tehtävä on pienentää ilmatilavuutta ja nostaa siten virtausno-peutta. Säiliön katossa on letku, jonka kautta ilmaan sekoittunut pöly johdetaan sa-vukanavaa kuvaavaan mittauskammioon (2) (myös kuvassa 5.8). Kammiossa on mit-tausyhteet (3), joihin on liitetty mittarien lähetinyksiköt sekä vastaanottimet. Puhallin (5) imee ilman suodattimen (4) läpi.

Testimittauksissa savukaasun tilalla käytettiin ilmaan sekoitettavaa pölyä. Mit-tauspölynä käytettiin sekä Particle Technology R10-testipölyä että tavallista puun-polttotuhkaa. Valmistajan ilmoittama kokojakauma testipölylle on esitettynä kuvassa 5.2.

Kuvassa 5.3 on esiteltynä tarkemmin mittauskammio ja -yhteet. Itse kammio on me-tallilieriö, jonka pituus on 80 cm ja halkaisija 20 cm. Kammiossa on poikittain kaksi mittausyhdelinjaa 1 ja 3 sekä vinosti linja 2, josta mitattiin myös skintillaatiosignaali.



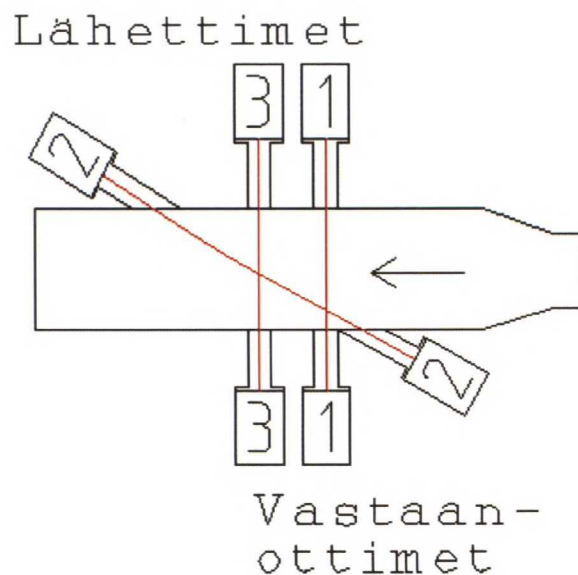
Kuva 5.1: Mittauslaitteisto



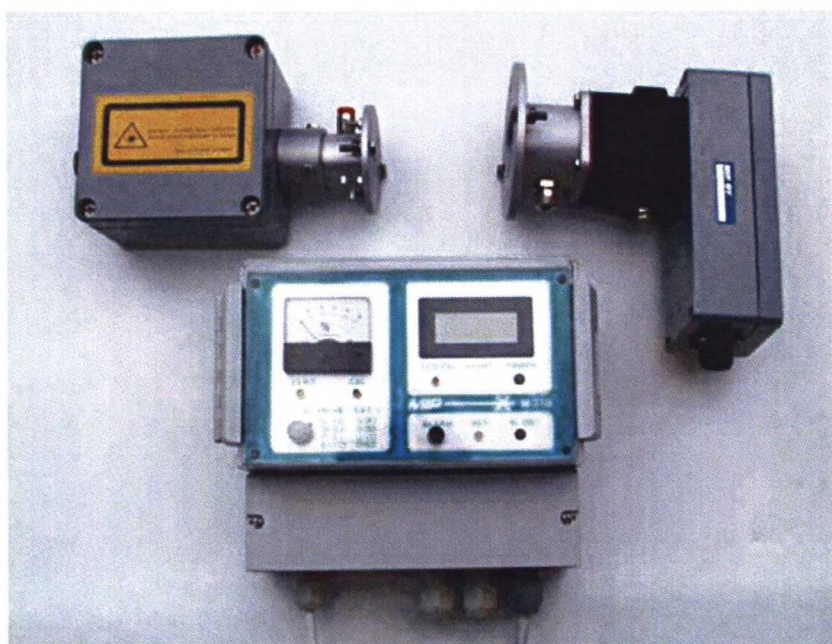
Kuva 5.2: Testipölyn Particle Technology R10 kokojakauma massan mukaan

Linjoihin 1 ja 2 on kumpaankin liitetty opasiteettimittari LM3188 (kuvassa 5.4), joka on yksinkertainen opasiteettiin perustuva hiukkasmonitori. Siinä on valolähteenä punainen laser ja vastaanottimessa puolijohdeilmaisin. Yhdelinjaa 3 ei käytetty lopullisissa mittauksissa.

Koska SP-opasiteettimittauksen havaintoraja on $20 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}/\text{m}$ ja lyhyemmän käytetyn



Kuva 5.3: Mittauskammio ja -yhteet



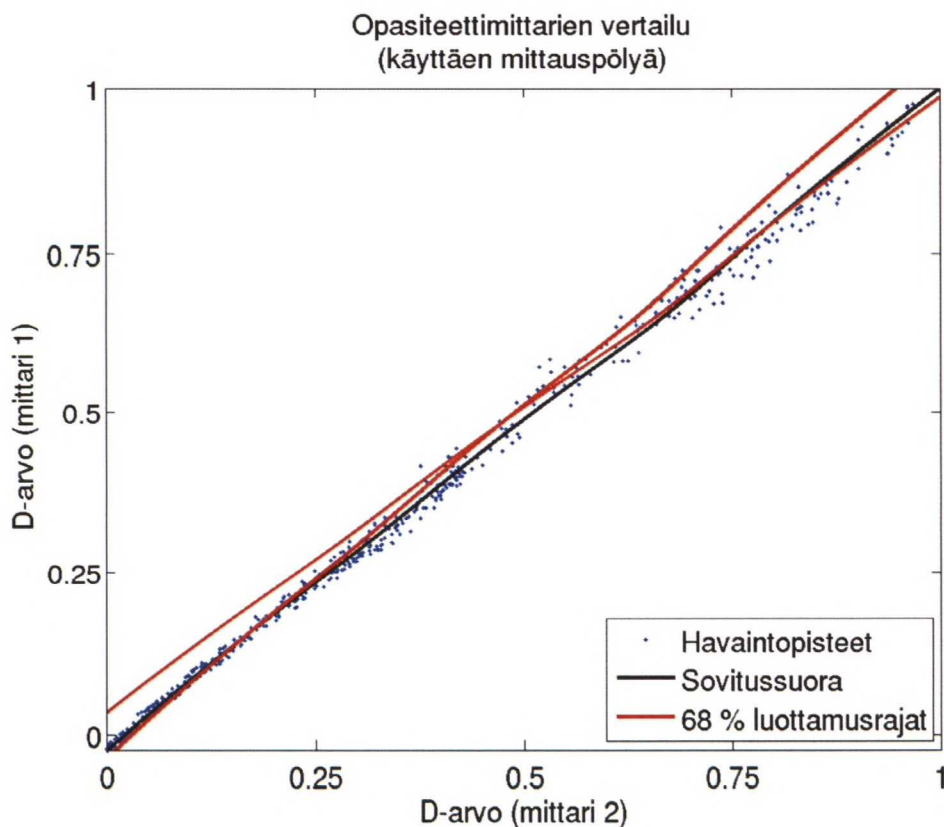
Kuva 5.4: Opasiteettimonitori LM3188. Ylhäällä vasemmalla lähetinyksikkö L318, oikealla vastaanotin R318 ja alhaalla monitoryksikkö M318

yhteen (1) mittauspituus vain 20 cm, hiukkaskonsentraation piti mittauksissa olla vähintään 100 mg/m^3 .

Suurin syy käyttää vinoa linjaa oli pidempi mittausmatka ja siten parempi dynamiikka sekä suurempi herkkyys pienille pitoisuuksille. Sen ansiosta, että toinen linja oli

suorassa, voitiin tarkastella pölynsyötön epästabiilisuuden vaikutuksia.

Kahta mittaussyhdettä käytettiin, jotta mitattaisiin samasta ilmiöstä kahdesta paikasta eri mittaussignaalit, eikä vain tulkittaisi kahdella tavalla samaa signaalia. Kanavien välille syntyi eroa esimerkiksi silloin, jos sama pölytihentymä ei mennyt molempien säteiden poikki. Käytännössä eri kanavista mitatut D-arvot korreloivat vahvasti, kuten kuvasta 5.5 voidaan nähdä. Kuvaajassa 68 % luottamusrajojen kulmakertoimen virhe on 7 %.

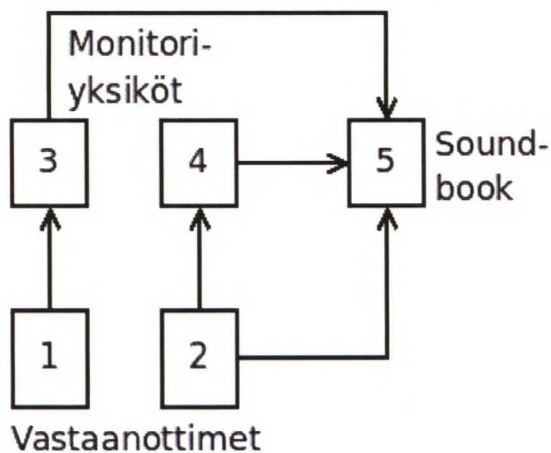


Kuva 5.5: Opasiteettimittarien vertailu

Kuvassa 5.6 on esiteltynä mittauskytkennän periaate. Pölymittareiden vastaanottimet (1) ja (2) on liitetty monitoriyksiköihin (3) ja (4), joista saadaan D-arvo jännitearvona tallentimelle (5). Skintillaatiosignaali otetaan tallentimelle myös suoraan vastaanottimelta (2). Tallentimena käytettiin Sinus Soundbook -monikanava-analysaattoria, jolla data tallennettiin äänitiedostomuotoon. Äänitiedostot siirrettiin toiselle tietokoneelle, jolla data tulkittiin GNU/Octaven avulla.

Näytteenottotaajuutena mittauksissa oli 52,1 kHz. Kokeilin mittauksien tulosten tulkinnan yhteydessä alinäytteistystä. Kun näytetaajuus oli 5,2 kHz, tulos ei muuttunut havait-

tavasti ja 520 Hz taajuudella eroa alkuperäiseen oli alle 1%. Tämä vastasi odotuksia, koska kohinasignaali on teorian perusteella jaksotonta ja korreloimatonta.



Kuva 5.6: Mittauskytkennän periaate



Kuva 5.7: Pölynäyttölaitteessa kammion alareunaan puhalletaan ilmavirtaus (sininen putki), joka leijuttaa pölyä. Kammion katossa on syöttöputki, jolla pöly johdetaan mittauskammioon.



Kuva 5.8: Mittauskammio päältä. Pöly kulkee kammiossa kuvassa oikealta vasemmalle. Kammion läpi on mittauskanavat, joista pölyä mitataan lasereilla.



Kuva 5.9: Kokonaiskuva mittausjärjestelyistä. Pöly syötetään etualalla olevaan torveen, josta se imetään läpi mittauskammion.

5.2 Ongelmia

Mittauksen isoimmat ongelmat liittyivät hiukkaskonsentraation tasaisuuteen. Sekä pölyn syöttö kammioon että sen sekoittuminen ilmavirtaan oli hyvin epätasaista.

Mittauksissa käytetyssä laitteistossa oli paljon puutteita savukanavan mallintamisessa. Mittauspöly oli paakkuuntunut, luultavasti kuljetustärinän takia, ja siksi syötössä ilmeni epätasaisuutta, kun paakku hajosi siirtoputkessa ja aiheutti pölypurskeen. Pöly oli myös herkkää hankaussähkölle ja tarttui siksi herkästi etenkin laitteiston muoviosiin. Syöttöputken reunasta irronnut pölypaakku näkyi hetkellisesti kohonneena pitoisuutena.

Pölyn syöttöpitoisuutta säädettiin muuttamalla ilmavirtausta syöttölaitteen kammioon. Vaikka painetta pystyttiinkin säätämään tarkasti, pölyn määrään tämä vaikutti epätasaisesti. Lisäksi pölypitoisuus vaelteli voimakkaasti.

Koska käytössä ei ollut puhdistusilmaa, linssit pääsivät likaantumaan mittausten kulessa. Tästä syystä myöhemmissä mittauksissa D-arvot ovat liian korkeita. Ero ei ole suuri, mutta aiheuttaa kuitenkin epätarkkuutta mittaustuloksiin.

Itse mittaukset sen sijaan sujuivat isommitta ongelmitta.

Luku 6

Laboratoriomittauksen tulokset

Mittausten tarkoituksena oli tutkia teorian ja simulaation ennustama skintillaation ja hiukkaskonsentraation vastaavuus. Mittauksia tehtiin sekä mittauspölyllä että tavallisella puunpolttotuhkalla. Mittauspöly vastaa savukaasun hiukkasia massaltaan ja kokojakaumaltaan. Vaikka tuhka on hiukkaskooltaan huomattavasti pölyä isompaa, skintillaatiomittauksella saatiin myös sille korrelaatio D-arvon kanssa. Yksi mittausten puute oli se, ettei käytössä ollut absoluuttista referenssimittaria hiukasmäärän mittaamiseen, vaan suhteellisia mittaustuloksia voitiin vertailla vain keskenään.

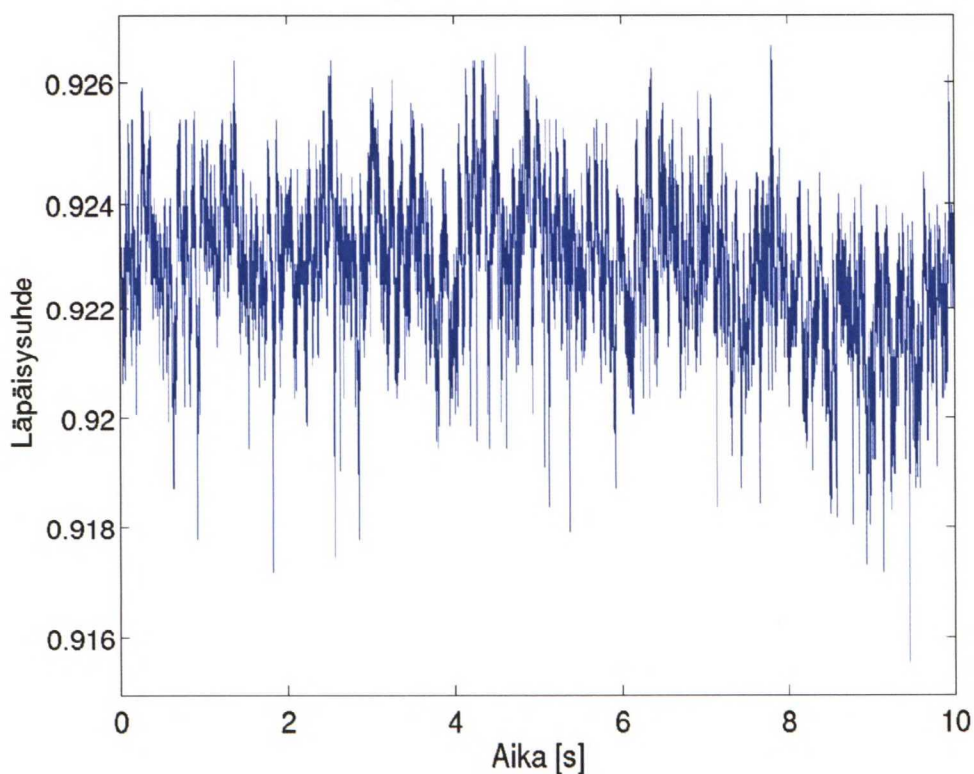
Mittausdatana tallennettiin kahdelta opasiteettimittarilta D-arvo sekä toisen mittarin ilmaisimelta läpäisyintensiteetti.

Virtausnopeus mittauskammiossa mitattiin Graywolf AS-201 -virtausmittarilla. Nopeus oli keskimäärin $20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, mutta vaikka virtausprofiilia yritettiin tasoittaa, virtaus oli silti hyvin pyörteistä. Myöskään pölyä ei saatu levitettyä tasaisesti koko ilmapirtaukseen, vaan se virtasi hyvin nauhamaisesti. Kuitenkin mittauksissa saatiin eri menetelmillä samansuuntaisia tuloksia ja etenkin D-arvot vastasivat toisiaan, joten mittauksia voidaan pitää vähintään suuntaa antavana.

Käytän tässä luvussa yhdelinjan 2 läpäisyintensiteetistä merkitään $I_{x,2}$ ja tästä lasketusta D-arvosta merkitään D_2 . Linjaan 2 liittyvä opasiteettimittari on mittari 2. Linjassa 1 on mittari 1, joka mittaa D-arvoa D_1 . Skintillaatio lasketaan linjan 2 läpäisyintensiteetistä $I_{2,x}$.

6.1 Tulokset

Kuvassa 6.1 on esitetty 10 sekunnin jakso linjasta 2 mitattua ilmaisinalodiodin signaalia. Kohinan voimakkuus signaalin voimakkuudesta on kuvan tapauksessa puolen prosentin luokkaa.



Kuva 6.1: Mitattua skintillaatiokohinaa linjasta 2

Mittausdataa saatiin hetkellisen läpäisyintensiteetin $I_{x,2}$ lisäksi molemmilta opasiteettimittareilta, eli yhteensä kolmella kanavalla. Koska skintillaatio ja D_2 lasketaan samasta signaalista $I_{x,2}$, voidaan tuloksia vertailemalla tarkastella eri mittausmenetelmien vaikutusta. Koska signaali $I_{x,1}$ kuvaa samaa hiukkaskonsentraatiota hieman eri paikassa, saadaan näin tutkittua mittausjärjestelyn toistettavuutta.

Teorian mukaan

$$c \propto D \propto \frac{\text{Var } I_{x,2}}{I_{x,2}^2}. \quad (6.1)$$

Koska D_2 ja $-\ln \overline{I_{x,2}}$ lasketaan samasta mittaussignaalista $I_{x,2}$, ne edustavat käytännössä samaa arvoa. Eroa niiden välille tulee vain tulosten käsittelyssä: mittarilla logaritmi lasketaan analogisella elektroniikalla ja $-\ln \overline{I_{x,2}}$ tietokoneella.

6.2 Skintillaatio

Mittauksissa osoittautui, että D-arvon ja skintillaation korrelaatio ei ollutkaan lineaarinen vaan neliöllinen

$$D \propto \sqrt{\frac{\text{Var } I_{x,2}}{\overline{I_{x,2}}^2}}. \quad (6.2)$$

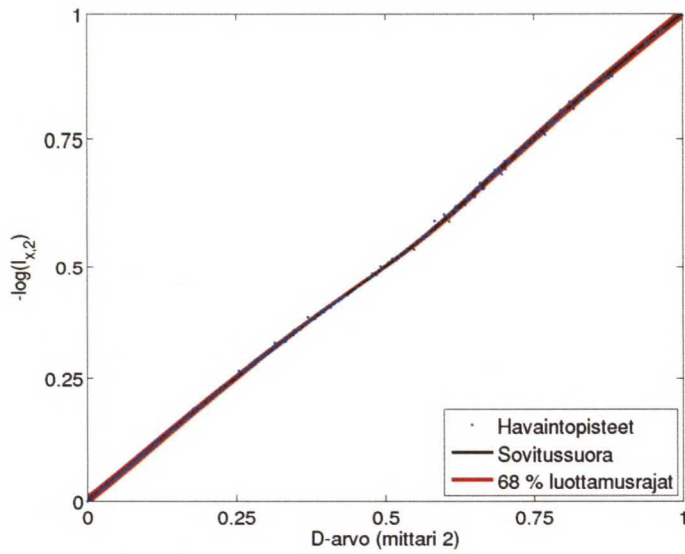
Syytä neliölliseen skintillaatioon yritettiin selvittää mm. signaalin neliöitymisestä, ilmaisimen epälineaarisuudesta ja virheistä koodissa. Kuitenkaan syytä ei diplomityön puitteissa kyetty selvittämään, vaan piti tyytyä siihen, että skintillaation neliöjuurella on lineaarinen vastaavuus D-arvon kanssa. Kaikissa tämän luvun kuvaajissa, missä skintillaatiolle ja D-arvolle esitetään vastaavuutta, skintillaation sijaan käytetään skintillaation neliöjuurta.

Skintillaatio on laskettu mittausdatasta jakamalla näytteet kolmen sekunnin jaksoihin ja laskemalla jaksoista varianssi ja keskiarvo. Mittareilta saadut D-arvot jaettiin samoin kolmen sekunnin jaksoihin ja keskiarvoistettiin. Mittari alipäästösuodattaa D-arvon aikavakiolla $\tau = 0,5$ s, joten D-arvo on kahteen kertaan keskiarvoistettu. Tämän merkitys on kuitenkin olematon, kuten kuvasta 6.2 näkyy. Sovitussuoran kulmakertoimen virheen 68 % luottamussuorat eroavat kulmakertoimesta 1 %.

Kuvassa 6.3(a) on mittauspölyllä tehtyjen mittausten tulos. Y-akselilla on skintillaation neliöjuuri ja x-akselilla kanavasta 1 mitattu D_1 . Kuvaan on myös piirretty keskiarvosuora ja 68 % luottamusrajat. Luottamusrajat eroavat sovitussuorasta 33 %.

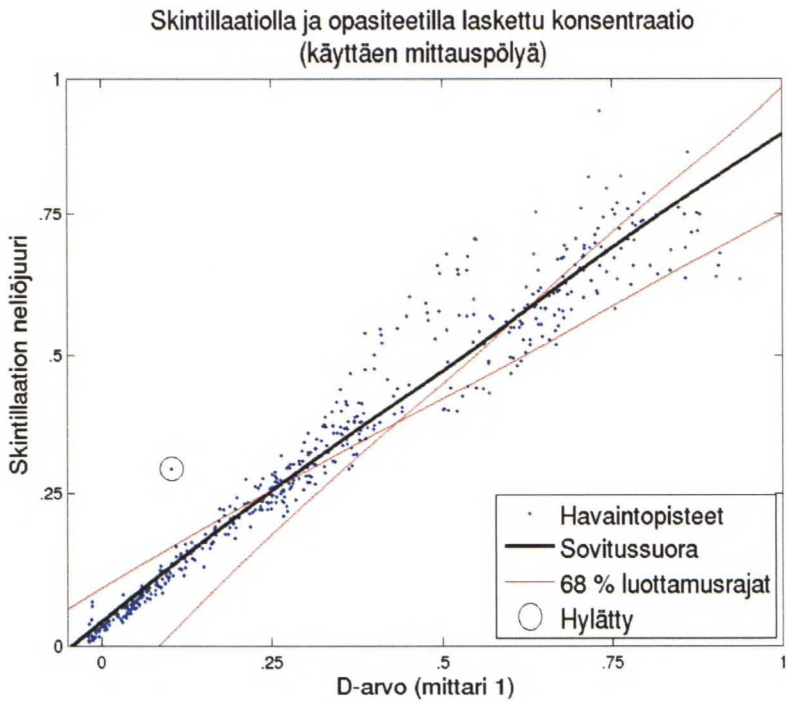
Koska mittauksilla ei pystytty selvittämään absoluuttisia arvoja, ovat kaikkien kuvaajien x- ja y-akselit skaalattu välille 0–1.

Kuvasta voidaan havaita, että skintillaation neliöjuuri vastaa D-arvoa lineaarisesti melko hyvin. Pienemmillä pitoisuuksilla eroa ei ole juuri lainkaan, isommilla pitoisuuksilla osasy hajontaan on epätasainen syöttö. Koska skintillaatio mittaa nimenomaisesti muutosta, nopeat muutokset pölynäytössä näkyvät skintillaatiossa isoina pitoisuuksina.

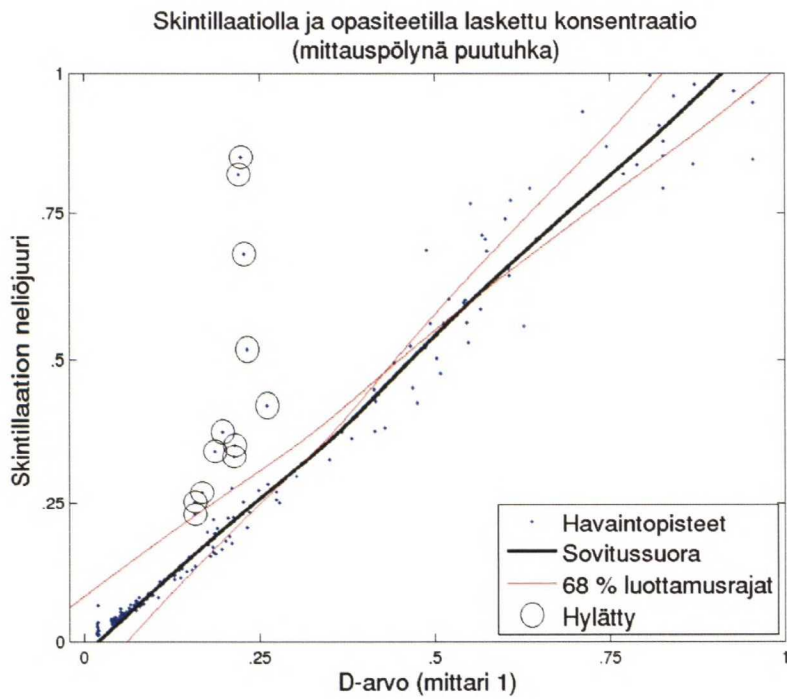


Kuva 6.2: Mittarin D-arvon ja signaalin $I_{x,2}$ logaritmin vertailua

Kuvassa 6.3(b) on vertailun vuoksi esitettynä tuhalla tehty mittaus. Tuhkan syötössä oli huomattavan paljon purskeita, jotka näkyvät hylättyinä arvoina. Kuitenkin myös tuhalla tehdyissä mittauksissa skintillaation antamat tulokset vastaavat hyvin opasteittimittarin D-arvoa.



(a)



(b)

Kuva 6.3: Skintillaatiomittaukset sekä pölyllä (ylempi kuva) että tuhkalla (alempi kuva)

6.3 Vaimennus

Yksi mittausten tarkoitus oli selvittää skintillaatiomittauksen toimivuus, kun optiset pinnat likaantuvat ja läpäisyintensiteetti alenee. Vaikka pintoja pyritään suojaamaan savukontaktilta puhdistusilmalla, ne kuitenkin aikaa myöten likaantuvat ja nokeentuvat. Perinteisellä opasiteettimittarilla pintojen likaantumisasastetta pitää valvoa, koska muuten likaantuminen vääristää mittaustulosta.

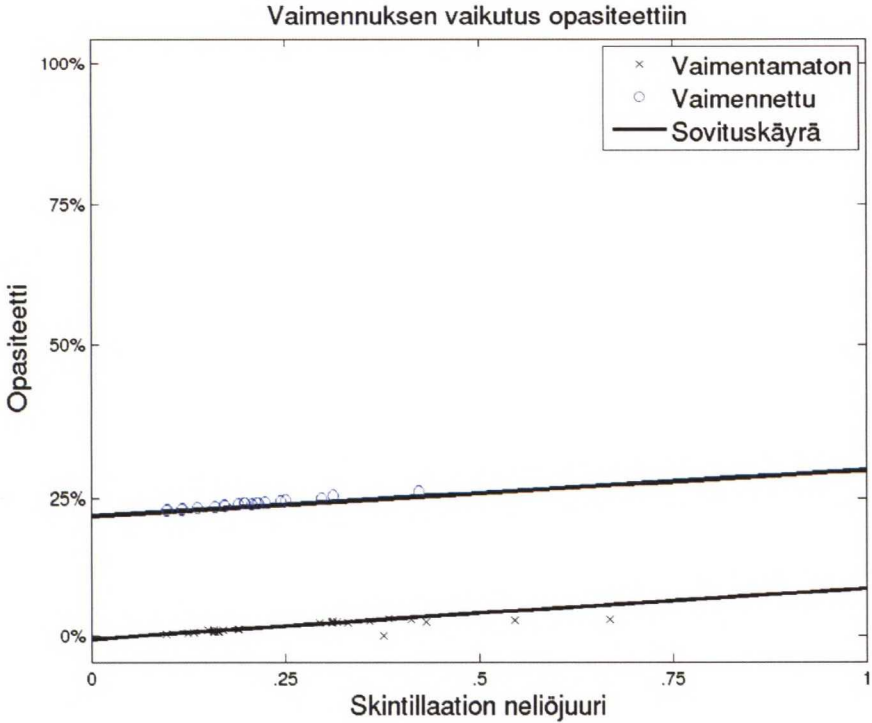
Lasersädetä yritettiin ensin himmentää tummennetulla lasilla, mutta osa säteestä heijastui lasista takaisin laseriin. Tämä aiheutti laserin takaisinkytkennässä silmukan, ja siksi laserin oma kohintataso nousi huomattavan paljon. Toimivimmaksi ratkaisuksi osoittautui säteen osittainen peittäminen metallilevyllä.

Mittauksissa verrattiin kanavasta 2 mitattua skintillaatiota molemmista kanavista mitattuihin D-arvoihin D_1 ja D_2 . Kanavan 2 intensiteettiä vaimennettiin osassa mittauksista edellä mainitulla tavalla.

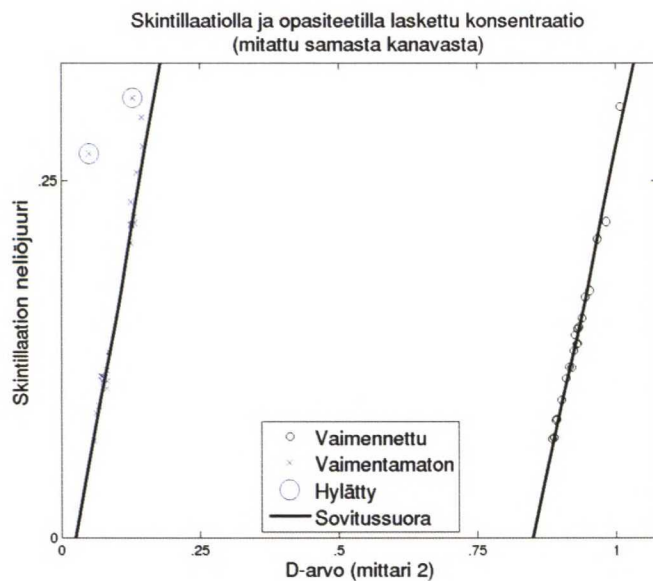
Kuvassa 6.4 on verrattu intensiteetistä $I_{2,x}$ lasketun skintillaation neliöjuurta samasta intensiteetistä laskettuun opasiteettiin. Vaimennuksen vaikutus intensiteettiin on noin 23 %, ja eri tapaukset onkin helppo erottaa toisistaan. Vaimennetulla linssillä pelkkä opasiteettiin perustuva mittaus olisikin antanut täysin väärän tuloksen.

Kuvassa 6.5(a) on verrattu kekenään skintillaatiota ja D-arvoa D_2 . Kuvassa nähdään vaimennuksen vaikutus opasiteetin kautta mitattavaan D-arvoon. Vaimennetusta ja vaimentamattomasta signaalista lasketut arvot ovat erilliset suorat skintillaation neliöjuureen nähden.

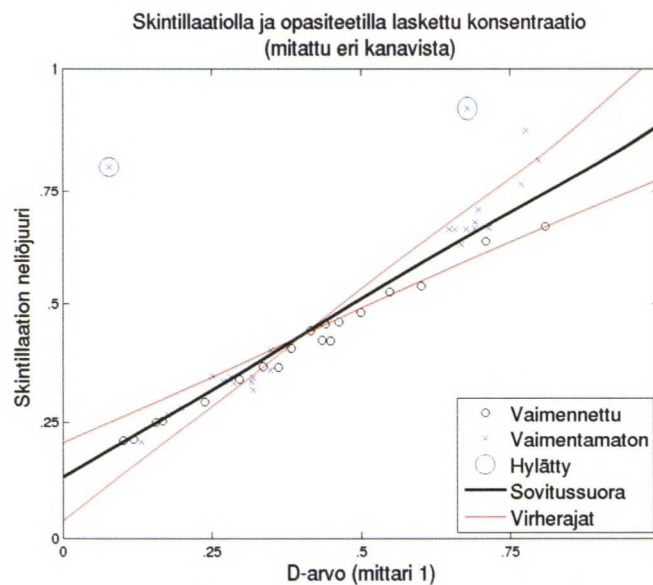
Kuvassa 6.5(b) puolestaan samaa skintillaatiota verrataan vaimentamattomasta kanavasta 1 mitattuun D-arvoon D_1 . Sekä skintillaation että opasiteetin kautta lasketut pisteet asettuvat samalle suoralle. Voidaan havaita, että laserin tehon vaimentaminen vakio-osaan ei vaikuta skintillaatioon. Tämän selvittäminen olikin yksi tälle diplomityölle asetettu tavoite.



Kuva 6.4: Läpäisyintensiteetti sekä vaimennetulla että vaimentamattomalla säteellä



(a)



(b)

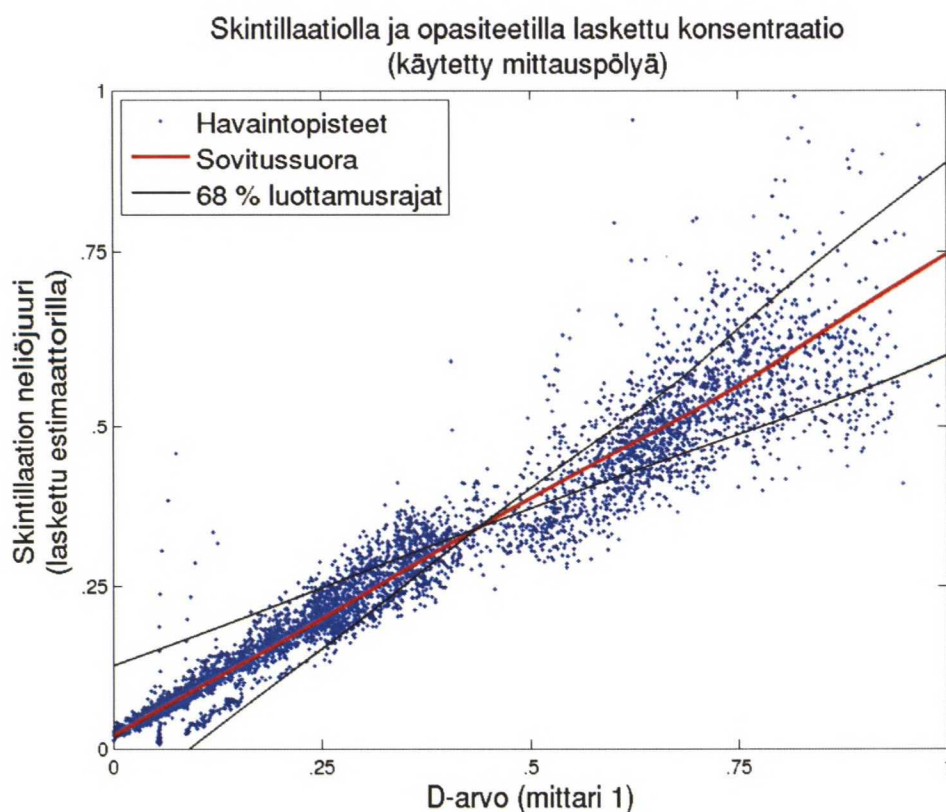
Kuva 6.5: Vaimennuksen vaikutus skintillaatioon, kun molemmat kanavat on vaimennettu (ylempi kuva) ja vain skintillaatiokanava on vaimennettu (alempi kuva)

6.4 Estimaattorin toiminta

Skintillaatioestimaattori koostuu kahdesta estimaattorista: se estimoi sekä keskiarvoa että keskimääräisten muutosten neliötä. Keskiarvon estimointi sujuu ongelmitta, sen si-

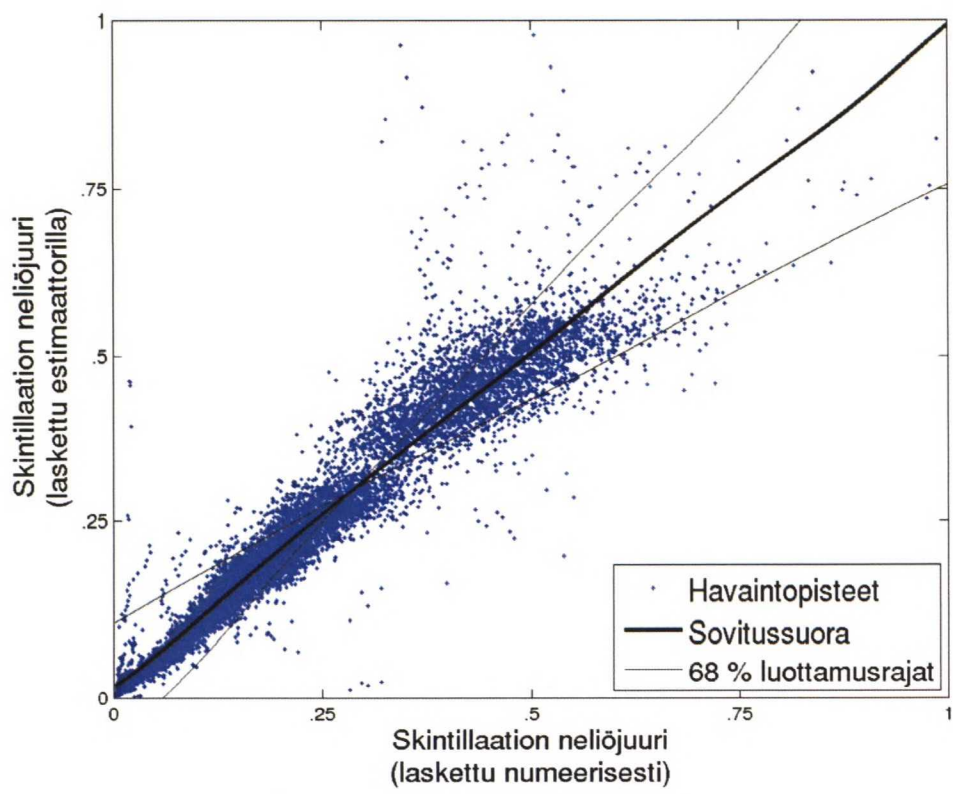
jaan varianssin suhteen estimaattori on hyvin herkkä äkillisille muutoksille. Epätasaisen syötön aiheuttamat pölypulssit näkyvätkin estimaattorissa äkillisesti kohonneina skintillaatioarvoina.

Kuvassa 6.6 on verrattu estimaattorilla ja opasiteettimittarilla laskettua konsentraatiota. Mittauksissa on käytetty mittauspölyä. Kuvaan piirrettyjen 68 % luottamussuorien kulmakertoimet poikkeavat keskiarvosuoran kulmakertoimesta 34 %.



Kuva 6.6: Estimaattorilla tulkittua mittausdataa

Kuvassa 6.7 on verrattu toisiinsa numeerista skintillaation laskentaa ja skintillaatioestimaattoria. Numeerisella laskennalla tarkoitan tässä sitä, että keskiarvo ja varianssi on laskettu GNU/Octavella. Kuvaan piirrettyjen 68 % luottamussuorien kulmakertoimet poikkeavat keskiarvosuoran kulmakertoimesta 33 %. Numeerinen tapa tarkoittaa mittausdatan jakamista jaksoihin ja varianssin sekä keskiarvon laskemista tietokoneella näistä jaksoista.



Kuva 6.7: Estimaattorin ja numeerisen laskennan vertailua

Luku 7

Johtopäätökset

7.1 Yhteenveto työstä ja tuloksista

Tässä diplomityössä tutkittiin skintillaatiomenetelmän soveltuvuutta hiukaspäästömittaukseen.

Mittauksissa skintillaation ja D-arvon välille saatiin neliöllinen vastaavuus, joten tuloksia tulkittaessa D-arvoa verrattiin skintillaation neliöjuureen. Sekä mittauspölyllä että tuhalla tehdyissä mittauksissa voitiin todeta skintillaation neliöjuuren vastaavan D-arvoa kohtalaisesti, samansuuntainen tulos saatiin estimaattorin toiminnalle.

Havaittiin myös, ettei optiikan likaantuminen vaikuttanut skintillaatioon mainittavasti.

7.2 Tavoitteet

Työlle asetettiin tavoitteeksi tutkia skintillaatiomenetelmän soveltuvuutta hiukaspäästömittaukseen. Skintillaatiomenetelmä ei eroa laitteiston puolesta merkittävästi opasiteettimenetelmästä, joten jos menetelmä osoittautuisi toimivaksi, voitaisiin vanhoihin opasiteettimittareihin lisätä skintillaatiomittausominaisuus pienin muutoksin, mm. lisäämällä laskentakapasiteettia.

Skintillaatiota ja sen ominaisuuksia tutkittiin laboratorio-oloissa tätä varten rakennetulla mittauslaitteistolla. Mittauksissa tutkittiin, kuinka hyvin skintillaatiomenetelmällä voi mitata savukaasun hiukkaskonsentraatiota. Samoin tehtävänä oli selvittää

linssin likaantumisen vaikutusta skintillaatioon sekä tutkia, toimiiko laskentaestimaattori mittausdatan käsittelyssä.

7.3 Mittaukset

Laboratoriomittaukset toteutettiin kustannussyistä pienin resurssein. Pölynsyöttölaite piti rakentaa itse ja vaikka sitä kehitettiin useassa vaiheessa paremmaksi, laitteiston lopullinen taso ei täysin tyydyttänyt.

Pölyn syöttö oli hyvin puuskittaista eikä pöly sekoittunut ilmavirtaan tasaisesti, vaan pölyvirta kammiossa oli pikemminkin nauhamaista. Pölypitoisuus vaihteli äkillisesti ja pölynauha vaelteli säteen edessä. Tämä aiheutti sen, ettei mitattava ilmiö missään vaiheessa pysynyt tasaisena.

Teorian mukaan hiukkaskonsentraatio on suoraan verrannollinen skintillaatioon ja D-arvoon:

$$c = K \cdot \frac{\text{Var } I_x}{\overline{I_x}^2} \propto D. \quad (7.1)$$

Kuitenkin mittausten perusteella

$$D \propto \sqrt{\frac{\text{Var } I_x}{\overline{I_x}^2}}. \quad (7.2)$$

Mittauksissa käytetyiltä opasiteettimittareilta saatiin tulos D-arvona, siksi skintillaatioitakin on tässä verrattu siihen.

Työssä ei saatu selville, onko tämä neliöllisyys jostain mittausjärjestelyissä olleesta viasta johtuva virhe vai ilmiön ominaisuus. Eräs mahdollinen selitys asialle on se, että lyhyen mittausmatkan ja suuren pitoisuuden takia ilmiö ylitti lineaarisen mallin rajat. Tätä ei kuitenkaan pystytty todentamaan.

Mittauspölyllä tehdyissä mittauksissa skintillaation neliöjuurella oli lineaarinen vastavuus D-arvon kanssa siten, että 68 %:n luottamusrajojen kulmakertoimet poikkesivat keskiarvosta 33 %. Tuhkalla tehdyissä mittauksissa luottamusrajan poikkeama oli 34 %.

Estimaattorilla lasketun skintillaation neliöjuuren luottamusrajat poikkesivat D-arvosta 34 % ja numeerisesti lasketusta 33 %.

Mittauksissa, joissa tutkittiin optiikan likaantumisen vaikutusta skintillaatioon, ei tuloksille haettu luottamusrajoja, todettiin vain, ettei likaantumisella ollut havaittavaa vaikutusta tulokseen, kun linssin likaantumisaste oli n. 20 %. Saman opasiteetin saavuttamiseen tarvitaan hyvin suuri hiukkaspitoisuus.

Mittauksissa ei ollut käytössä absoluuttista referenssimittaria, vaan tuloksia voitiin verrata vain toisiinsa. Tästä johtuen mittauksissa ei pystytty selvittämään pienintä tai suurinta pitoisuutta, jota skintillaatiomenetelmällä voi mitata.

Kysymyksistä suurimpaan, eli soveltuuko skintillaatio hiukkasmittaukseen, ei tässä työssä saatu tyhjentävää vastausta. Mittauksissa skintillaation neliöjuuren voitiin todeta seurailevan kahden eri mittarin D-arvoa, mutta epävarmuuden ollessa kolmanneksen luokkaa, ei menetelmä tällaisenaan sovellu mittauskäyttöön.

Se voitiin kuitenkin todeta, että jos tarkkuutta saadaan parannettua ja voidaan valmistaa skintillaatiomenetelmällä toimiva mittari, linssin likaantumisaste saa olla ainakin 20 %, ilman että se haittaa mittauksia. 20 %:n opasiteetti tarkoittaa huomattavan suurta hiukkaskonsentraatiota, eikä opasiteetti yleensä nouse sen yli piipuissa, joissa käytetään suodatinta.

Vaikka skintillaatiota ei saataisikaan varsinaiseksi mittausmenetelmäksi, sen riippumattomuutta optiikan likaantumisesta voidaan kuitenkin käyttää referenssinä arvioitaessa likaantumisastetta, kun itse mittaukseen käytetään opasiteettimittaria.

7.4 Suositukset

Tarkempiin mittauksiin pyrittäessä pölyn syöttölaitetta tulee kehittää siten, että pitoisuus pysyy tasaisena ja sen suuruutta voidaan helposti ja luotettavasti säätää. Samoin on varmistettava pölyn tasaisempi sekoittuminen ilmavirtaan ja rajoitettava ilmavirran pyöteisyyttä. Tähän voidaan käyttää esimerkiksi erilaisia ilmanohjaimia.

Mikäli mittausten epätarkkuus johtui epätasaisesta syötöstä, voidaan paremmilla mittauksilla vahvistaa joko skintillaation toimivuus tai sen toimimattomuus. Tulevissa mittauksissa on tarkoitus käyttää referenssinä näytteistysmittaria, jolla saadaan absoluuttiset tulokset.

Koska mittausten perusteella tuhka näyttäisi sopivan mittauspölyksi, voidaan sitä käyttää jatkossa. Tämä auttaa myös alentamaan kehityskustannuksia.

Menetelmän testaamiseksi on tarkoitus saada mittausdataa myös oikeasta polttoprosessista lämpölaitoksen savupiipusta. Kun mittausjärjestely on kehitetty riittävän tarkaksi, voidaan mittarin prototyyppi asentaa kenttätestausta varten piippuun.

Kohinan simuloinnissa havaittiin, että virtausnopeus vaikuttaa kohinan taajuusspektriin. Taajuusanalyysin käyttöä voisi tutkia tarkemmin, esim. pystyttäisiinkö sen kautta mittaamaan virtausnopeutta. Nopeus on kuitenkin oleellinen tekijä, kun lasketaan lopullisia päästömääriä.

Huolimatta edellä esitetyistä epätarkkuuksista ja ongelmista skintillaatio on osoittautunut potentiaalisesti menetelmäksi hiukkaspäästömittaukseen. Siksi sitä kannattaa tutkia lisää.

Kirjallisuutta

- Bivinis, Dan (Attn.). 2000. *Current Knowledge of Particulate Matter Continuous Emission Monitoring*. Tech. rept., U.S. Environmental Protection Agency.
- Chen, Anshi, Zu, Jing, Miao, Yansong, Su, Tiexiong, Fan, Wenxing, & Zhang, Xianqiu. 1998a. Experiments on Particulate Emission Monitoring by Means of Scintillation. *Pages 1089–1092 of: Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1998*. IEEE.
- Chen, Anshi, Zu, Jing, Wei, Ping, & Miao, Yansong. 1998b. Study on Particulate Emission Monitoring by Means of Scintillation. *Pages 1018–1022 of: Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1998*. IEEE.
- Electrowatt-Ekono. 2003. *Uusien säädösten vaikutus savukaasupäästöjen mittauksiin*. Energia-alan keskusliitto Finergy.
- Födisch, Holger. 2004. *Staubemissionmesstechnik*. expert verlag. Stand der Technik - Messverfahren - Anwendungsbeispiele.
- Hinds, William C. 1999. *Aerosol Technology*. Wiley-Interscience. ISBN 9780471194101.
- Huttunen, Leena. 2006. *Pienhiukkaset kuriin*. Ympäristö-lehti 3/2006, Suomen ympäristökeskus.
- Ilmatieteen laitos. 2008. *Hiukkasten muutunta ilmakehässä*. http://www.fmi.fi/tutkimus_ilmakeha/ilmakeha_5.html, viitattu 26.1.2009.
- Martin, Prof. Peter. 1994. Particulate Measurement in Flue Gases. *In: Continous Emission Monitoring for Process Control and Regulatory Compliance*.
- Mishchenko, Michael I., Travis, Larry D., & Lacis, Andrew A. 2002. *Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles*. Cambridge University Press. ISBN 0-521-78252-X.

- Oksa, Panu. 2008. *Pölyjen terveydelliset haittavaikutukset*. Insko-seminaarissa 23.1.2008 pidetyn esitelmän ”Pölynpoisto teollisuudessa”luentokalvot.
- Pakkanen, Tuomo. 1997. *Pienhiukkasseminaari, Tampereen teknillinen korkeakoulu, 6.5.1997*. Seminaariesitelmä.
- Saarikoski, Sanna. 2008. *Chemical mass closure and source-specific composition of atmospheric particles*. Väitöskirja, Helsingin yliopisto.
- Tuomisto, Jouko. 2001. Liikenteen ja energiantuotannon päästöt ja terveys. *Suomen Lääkärilehti*, 1507–1517.
- VTT. 2004. *Päästömittausten käsikirja, osa II*. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Ilmansuojeluyhdistys ry., Ympäristöministeriö. Päästöjen tarkkailu ja kiinteästi asennettujen päästömittalaitteiden laadunvarmistus.
- VTT. 2007. *Päästömittausten käsikirja, osa I*. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Ilmansuojeluyhdistys ry., Ympäristöministeriö. Päästömittaustekniikan perusteet.
- Ympäristökeskus. 2006. *Suomen ympäristökeskuksen tiedote 5.5.2006 Hiukkaspäästöistä valtaosa syntyy energiantuotannosta ja liikenteestä*. <http://www.environment.fi/default.asp?contentid=182704&lan=fi>, viitattu 16.9.2008.
- YTV. 2009. *Pienhiukkaspitoisuuksia eri mittausasemilla*. http://www.ytv.fi/FIN/ilmanlaatu/ilmansaasteet_ja_saa/pienhiukkaset/etusivu.htm, viitattu 23.1.2009.

Liite A

Simuloinnin lähdekoodi

```
%% Ohjelma simuloi hiukkasten aiheuttamaa skintillaatiokohinaa

clear all;

ds=.0025;          %% säde
l=2;               %% piipun halkaisija [m]
vi=24;             %% virtausnopeus piipussa [m/s]
roo=1e9;           %% hiukkasten tiheys [mg/m^3]

cMin=1;            %% minimipitoisuus (mg/m^3)
cMax=33;           %% maksimipitoisuus (mg/m^3)

Fs=1e6;            %% näytetaajuus (1MHz)

median=log(1.5);    %% hiukkaskoon mediaani = 1.5 um
sigma2=log(1.8);    %% hiukkaskoon varianssi = 1.8 um^2

jakaja=10;          %% laskentajakson pituus (1 sekunti/jakaja)

%% Lasketaan säteen ohittavien hiukkasten määrä tarkasteluajassa

%% hiukkasen halkaisija [m]
dh=1e-6*exp(randn(1,1e7)*sigma2+median);

%% Hiukkasen keskimääräinen tilavuus [m^3]
Vh=mean(pi/6*dh.^3);

%% Hiukkasen keskim. massa [mg]
mh=roo*Vh;

%% Säteen läpi menevä ilmamäärä 1/jakaja sekunnissa [m^3/s]
Vi=ds*l*vi/jakaja;
```

```

%% Hiukkaskonsentraatio on määrä*massa/tilavuus
%% c=n*mh/Vi;

% Hiukkasmäärä
% n=c*Vi/mh;

% N on hiukkasmäärä/konsentraatio, N=n/c
N = Vi/mh;

%% c = K*D[T]/E[T]^2, eli K on kerroin, jolla saadaan laskettua
%% konsentraatio c skintillaatiosta
K=ds^2*pi/4*mh/(mean(dh.^2*pi/4)^2+var(dh.^2*pi/4))/1;

%% Totuusarvo, tallennetaanko kohinajakso wav-tiedostoon
tallenna=0;

for ajo=1:3
    for C=Cmin:Cmax
        n=floor(C*N);                %% Hiukkasmäärä
        T=ones(1,2*Fs/jakaja);      %% T:n pituus 1s/jakaja
                                    %% (puolikkaat kerrotaan päällekkäin)

        %% arvotaan hiukkasen koko
        dh=1e-6*exp(randn(1,n)*sigma2+myy);

        for i=1:n
            s=floor(ds*sqrt(1-rand^2)/vi*Fs);    %% hiukkasen kulkuaika
                                                    %% säteen halki [samples]
            j=floor(rand*Fs/jakaja)+1;          %% hiukkasen
                                                    %% tuloajanhetki (säteen eteen)
            T(j:j+s)=T(j:j+s)*(1-dh(i)^2/ds^2); %% vähennetään läpäisyintensiteetistä
                                                    %% hiukkasen osuus
        end

        ulos=T(1:Fs/jakaja).*T(Fs/jakaja+1:end); %% yhdistetään puolikkaat

        if(tallenna==1)
            %% tallennetaan äänitiedostona, tiedoston nimessä C-arvo
            filu=['wavit/ajo=' int2str(1) ' jako=' int2str(jakaja) ' C=' int2str(C) '.wav'];
            wavwrite (ulos,Fs,32,filu)
        end

        if(tallenna==0)
            %% lasketaan suoraan skintillaatio ja tallennetaan tekstitiedostoon
            SKI=var(ulos)/mean(ulos)^2;
            c=K*SKI;
            out=fopen('tulostus.txt','at');
            fprintf(out,'C=%d C=%f\n',C,c);
            fprintf(1,'AJO=%d C=%d C=%f\n',ajo,C,c);
            fclose(out);
        end
    end
end
end

```